



**ФЕДОРЕЦ  
Наталья  
Глебовна**

заведующая  
лабораторией лесного  
почвоведения, доктор  
сельскохозяйственных  
наук



**БАХМЕТ  
Ольга  
Николаевна**

ведущий научный  
сотрудник, доктор  
биологических наук



**МЕДВЕДЕВА  
Мария  
Владимировна**

старший научный  
сотрудник, кандидат  
биологических наук



**АХМЕТОВА  
Гульнара  
Вялитовна**

научный сотрудник,  
кандидат  
биологических наук



**НОВИКОВ  
Сергей  
Геннадьевич**

младший научный  
сотрудник, кандидат  
биологических наук



**ТКАЧЕНКО  
Юлия  
Николаевна**

ведущий почвовед



**СОЛОДОВНИКОВ  
Антон  
Николаевич**

научный сотрудник,  
кандидат  
биологических наук

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ КАРЕЛИИ

# ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ КАРЕЛИИ





КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ЛЕСА

KARELIAN RESEARCH CENTRE  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCE  
FOREST RESEARCH INSTITUTE

# HEAVY METALS IN SOILS OF KARELIA

Petrozavodsk  
2015

# ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ КАРЕЛИИ

Петрозаводск  
2015



УДК 631.416.8 (470.22)

ББК 40.3 (2Рос.Кар.)

Т99

Т99 **Тяжелые металлы в почвах Карелии** / Отв. ред. Г. В. Ахметова. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 222 с.: ил. 60, табл. 64. Библиогр. 203 назв.

Авторы: *Н. Г. Федорец, О. Н. Бахмет, М. В. Медведева, Г. В. Ахметова, С. Г. Навиков, Ю. Н. Ткаченко, А. Н. Солодовников*

ISBN 978-5-9274-0674-6

В монографии обобщены результаты многолетних исследований загрязнения почв Карелии тяжелыми металлами. Показаны закономерности содержания и распределения тяжелых металлов по профилю в почвах ненарушенных лесных экосистем. Приведены результаты фоновой мониторинга почв государственных заповедников «Костомукшский» и «Кивач», исследований почв в различных типах ландшафтов среднетаежной подзоны Карелии. Эти данные могут служить исходной точкой для индикации загрязнения почв тяжелыми металлами. Обобщены и представлены результаты экологического мониторинга в зоне воздействия Костомукшского горно-обогатительного комбината, являющегося одним из наиболее крупных источников загрязнения атмосферы и почв в Карелии. В связи с интенсивным освоением лесных ресурсов актуальна приведенная информация о накоплении тяжелых металлов в почвах естественных и пройденных рубками основных лесов. Выявлены особенности загрязнения г. Петрозаводска тяжелыми металлами и составлены картосхемы их содержания в верхних горизонтах городских почв. Установлен порог чувствительности микроорганизмов к тяжелым металлам в зависимости от их систематического положения, а также биологической активности почв на фоне изменений почвенных факторов.

Представленный материал может быть использован для разработки природоохранных мероприятий, решения задач охраны почв от загрязнения, для проведения экологического мониторинга.

Для специалистов биологического профиля, преподавателей, аспирантов и студентов.

УДК 631.416.8 (470.22)

ББК 40.3 (2Рос.Кар.)

The results of years of research on the heavy metal contamination of soils in Karelia are summarized in this book. Patterns in the content and distribution of heavy metals across the soil profile in undisturbed forest ecosystems are demonstrated. The results of background monitoring of soils in strict nature reserves Kostomukshsky and Kivach, and of soil surveys in different types of Karelian mid-taiga landscapes are reported. These data can serve as the baseline for indication of soil heavy metal contamination. The results of environmental monitoring in the impact zone of the Kostomuksha mining and ore-dressing mill, which is one of the biggest point sources of air and soil pollution in Karelia, are summarized and presented. The reported information about heavy metal accumulation in soils of natural and managed pine forests is of high relevance in the context of intensive forest use. The patterns of heavy metal pollution in the City of Petrozavodsk were identified, and the content of heavy metals in topsoils in the city was mapped. The threshold of microorganisms' sensitivity to heavy metals depending on their taxonomy, as well as the biological activity of soils as related to changes in soil factors were determined.

The material provided in the book can be used to work out nature conservation actions, to address soil protection tasks, to carry out environmental monitoring.

Meant for specialists in biological disciplines, educators, PhD and graduate students.

ISBN 978-5-9274-0674-6

© Карельский научный центр РАН, 2015

© Институт леса КарНЦ РАН, 2015

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Почва является одним из главных природных богатств человечества, и перед обществом стоит задача бережного и рационального его использования. В настоящее время с развитием хозяйственной деятельности человека все чаще вспоминаются слова великого русского ученого В. И. Вернадского (1936) о том, что «человечество, взятое в целом, становится мощной геологической силой» и что «лик планеты – биосфера – химически резко меняется человеком сознательно и главным образом бессознательно». В связи с этим исследования химического состава природных сред являются весьма актуальными.

Сотрудниками лаборатории лесного почвоведения Института леса Карельского научного центра проведено значительное количество исследований содержания и загрязнения почв Республики Карелия, собран обширный материал по накоплению тяжелых металлов как в естественных, так и в трансформированных почвах. Полученный материал был систематизирован и представлен в данной работе.

Книга состоит из семи глав. Первая глава посвящена обзору проблемы загрязнения почв тяжелыми металлами. Во второй и третьей главах рассматриваются исследования содержания тяжелых металлов в естественных лесных почвах, полученные результаты данных исследований могут считаться фоновыми для изучения загрязнения тяжелыми металлами почв со сходными условиями. Следующие главы посвящены изучению загрязнения почв, подвергающихся антропогенному воздействию. Описано влияние на почвы одного из крупнейших на Северо-Западе промышленных предприятий – Костомукшского ГОКа; дана эколого-микробиологическая оценка состояния почв, сформировавшихся в условиях урбанизации; а также изучено изменение микроэлементного состава почв, находящихся на разных сукцессионных стадиях восстановления после вырубki леса. В по-



следней главе рассматриваются результаты комплексного исследования загрязнения почв тяжелыми металлами на всей территории Карелии.

Представленные данные могут быть использованы специалистами различных природоохранных организаций, при планировании мониторинговых исследований, а также для информационного обеспечения управленческих решений в землепользовании.

Таким образом, полученные данные могут послужить основой прогнозирования загрязнения почв тяжелыми металлами в данных биогеоклиматических условиях.

Авторы признательны коллективу лаборатории лесного почвоведения Института леса КарНЦ РАН, принимавшему участие в полевых и лабораторных исследованиях, а также сотрудникам Центра коллективного пользования «Аналитическая лаборатория» Института, которые выполнили значительное количество определений тяжелых металлов.

*Представленный материал был получен при выполнении государственного задания ИЛ КарНЦ РАН (0220-2014-0006) и программы приграничного сотрудничества в рамках Европейского инструмента соседства и партнерства «Карелия» (проект «Развитие лесных плантаций для облесения хвостохранилища и фиторемедиации в России»).*

*Книга издана Карельским научным центром РАН при финансовой поддержке проекта «Развитие лесных плантаций для облесения хвостохранилища и фиторемедиации в России».*

## PREFACE

The soil is one of the key natural assets available to the humankind, and the society must take care to manage it prudently and sustainably. As the scope of human activity has been growing, one is more and more reminded of sayings by eminent Russian scientist V. I. Vernadsky (1936) that “Mankind taken as a whole is becoming a powerful geological force” and that “Chemically, the face of our planet, the biosphere, is being sharply changed by man, consciously and even more so, unconsciously”. It is therefore crucial to investigate the chemical composition of natural environments.

The team of the Forest Pedology Laboratory of the Forest Research Institute at the Karelian Research Centre have carried out a great number of studies of soil pollution in the Republic of Karelia, gathered substantive material on the accumulation of heavy metals in both natural and disturbed soils. This expensive material was summarized and presented in this volume.

The book is made up of 7 interrelated chapters. The first chapter is an overview of the soil heavy metal pollution problem. The second and third chapters are concerned with surveys of heavy metals in natural forest soils. The results of such surveys can be taken as the background for the study of heavy metal contamination of soils with similar conditions. The next chapters are devoted to the studies of pollution of soils exposed to human impact. The impact on soils of one of the largest industrial enterprises in Northwest Russia – Kostomuksha mining and ore-dressing mill, is described; ecological-microbiological assessment of soils formed in urban circumstances is provided; and changes in the microelement composition of soils at different stages of the post-logging succession are investigated.

The last chapter deals with the results of an integrated study of heavy metal pollution of soils throughout Karelia. These data can



applied by specialists from various conservation organizations and agencies when planning monitoring operations, as well as to support land use decision-making.

Thus, the resultant data can underlie the forecasts of soil heavy metal pollution under the given biological, geological and climatic conditions.

The authors are grateful to the staff of the Forest Pedology Laboratory, Forest Research Institute, KarRC RAS involved in field and laboratory studies, as well as to specialists from the Institute's Analytical Laboratory, who performed a great number of heavy metal determinations.

*The book was published by Karelian Research Centre of the Russian Academy of Science with financial support from «Development of tree plantations for tailing dumps afforestation and phytoremediation in Russia» project.*

## **Глава 1. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ (ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ)**

### **Chapter 1. HEAVY METALS POLLUTION OF SOILS (OVERVIEW OF THE PROBLEM)**

Охрана окружающей среды от загрязнения в настоящее время стала насущной задачей общества, особенно в странах с развитой индустрией. Ухудшение природной среды поставило перед учеными-почвоведомы задачу оценки экологического состояния и потенциала почв как центрального компонента биосферы, являющегося мощным аккумулятором и трансформатором техногенных потоков вещества и энергии (Ковда, 1985). Почвенный покров как наиболее консервативный компонент экосистемы определяет ее состояние и устойчивость, играет важную роль в формировании, поддержании и сохранении биологического разнообразия. Состояние почвенного покрова является важнейшим показателем глубины происходящих изменений в окружающей среде. До недавнего времени предполагалось, что устойчивость почв беспредельна, и она может защищать сопредельные среды при любых уровнях загрязнения. Однако под влиянием антропогенного воздействия почва деградирует, а это значит, что ее естественная структура распадается, и она частично или полностью утрачивает буферные свойства к внешнему воздействию. Устойчивость почв по отношению к различным загрязнителям неодинакова, для прогноза изменения почвенно-экологической обстановки необходимо учитывать: химический состав загрязняющих техногенных веществ, различные направления ответных реакций почв на данный конкретный тип химического воздействия и свойства самой почвы (Арманд, 1983; Глазовская, 1983, 1992; Ильин, 1995; Израэль, 1984; Минкина и др., 2006; Шильцова, 1999; Bowen, 1979). Потребность в информации о современном состоянии почв, ее устойчивости и



чувствительности к антропогенным воздействиям очень велика в связи с деятельностью по природоохранному планированию и оценке природной среды (Возможности..., 2000).

Важным показателем состояния окружающей среды считается содержание в ней тяжелых металлов, которые являются одними из наиболее опасных среди многочисленных загрязнителей в окружающей среде (Беспамятнов, Кротов, 1985; Добровольский, 1980; Золотарева, 1983; Копчик и др., 1998; Малахов, Сенилов, 1992; Сысо, 2007; Berrow, Reaves, 1986; Brown et al., 1987; Jorgensen, 1991; Kabala, Singh, 2001). Повышенные концентрации тяжелых металлов в почве вызывают негативные функционально-экологические изменения в компонентах природной среды, снижение биоразнообразия природных экосистем (Акентьева, Беляева, 1992; Лесные экосистемы..., 1990).

Термин «тяжелые металлы» применим более чем к 40 химическим элементам, атомная масса которых составляет более 50 атомных единиц (Орлов и др., 1991). Однако в эту группу входят и многие металлы-микроэлементы, жизненная необходимость которых для нормального роста и развития живых организмов доказана, несмотря на их незначительное содержание в объектах (Алексеев, 1987; Ильин, 1991; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Кашин, Иванов, 2002). Набор элементов, входящих в группу «тяжелые металлы», во многом совпадает с группой «микроэлементы», поэтому, как отмечают многие исследователи (Алексеев, 1987; Алексеенко, 2000; Ильин, 1991; Ильин, Сысо, 2001), данные термины – это категории, скорее всего, качественные, а не количественные и привязаны к крайним вариантам экологической обстановки. Д. С. Орлов отмечает, что нет токсичных элементов, а есть их токсичные концентрации (Орлов и др., 2005). Несмотря на достаточно большое количество работ по данной проблематике, нет единого мнения о степени опасности в почвах того или иного тяжелого элемента (Водяницкий, 2012).

Тяжелые металлы находятся в почве в разных формах (Кадацкий и др., 2001; Ладонин, 2002; Ross, 1999). Как правило, при экологическом мониторинге техногеннозагрязненных почв принято определять валовое содержание тяжелых металлов, а также извлекаемых смесью крепких растворов кислот. Определение содержания подвижных форм желательно проводить в случае высоких их

валовых количеств в почве, а также когда необходимо характеризовать миграцию металлов-загрязнителей из почвы в растения (Методические указания..., 1992).

Источники поступления тяжелых металлов в почву делят на естественные (природные) и техногенные (Ильин, 1991; Bheemalingeswara, 1991). Главным естественным источником являются горные породы, на продуктах выветривания которых формируется почвенный покров (Веригина и др., 1964; Ковда и др., 1959). При выветривании горных пород, разрушении первичных и образовании вторичных минералов происходит рассеяние микроэлементов и их распределение между отдельными компонентами минерального субстрата. Формирование микроэлементного состава почвообразующих пород в свою очередь обусловлено их гранулометрическим и минералогическим составом, а также характером коренных пород (Виноградов, 1962; Добровольский, 1983, 2003; Ковда, 1985; Ковда и др., 1959; Протасова, 2003; Протасова, Беляев, 2000; Протасова, Щербаков, 2004). Степень влияния первичных минералов горных пород на микроэлементный состав почв и пород зависит не только от исходного минералогического состава, но и от длительности и интенсивности выветривания и, соответственно, глубины трансформации минералов (Зырин, 1968; Ковда, 1988).

Несмотря на то что в процессе почвообразования происходит перераспределение химических элементов почвообразующей породы, специфические свойства и особенности химического состояния микроэлементов практически навсегда сохраняются в почвах, за исключением случаев техногенного загрязнения. Микроэлементный состав осадочных пород в значительной степени определяется миграционной способностью микроэлементов в условиях гипергенеза, а также характером и интенсивностью биологических процессов, происходящих в момент образования этих пород (Ковда, 1973).

Влияние минералогического состава пород на их микроэлементный состав определяется содержанием в них кварца, глинистых и акцессорных минералов. Кварц, почти лишенный микроэлементов, выполняет роль регулятора уровня последних (Зырин, 1968). Тяжелые минералы являются концентраторами многих микроэлементов (Добровольский, 1999). Чем больше тяжелых минералов в продук-

тах выветривания, тем выше содержание микроэлементов. Многие микроэлементы аккумулируются в высокодисперсной массе переотложенного материала, представленной глинистыми минералами.

Также к природным источникам поступления тяжелых металлов относятся космическая и метеоритная пыль, вулканические газы (Ковда, 1985) и биологический круговорот в системе почва–высшее растение (Микроэлементы..., 1973).

В почвы гидроморфного ряда микроэлементы в значительной мере поступают с *почвенно-грунтовыми водами*. При выпадении в осадок соединений из почвенно-грунтовых вод почвы могут обогащаться следующими элементами: бором, йодом, железом, кобальтом, никелем, цинком, ванадием, медью, барием, стронцием, литием, цезием, рубидием (Виноградов, 1962).

С растительным опадом в составе прочных комплексных органических соединений поступают в почву мобильные формы микроэлементов. Аналогичные комплексы образуются при ассимиляции этих элементов микроорганизмами. Растворимые органические соединения, идущие из лесной подстилки при разложении корней, содействуют подвижности микроэлементов в самой почве (Микроэлементы..., 1973).

Однако в настоящее время техногенные источники тяжелых металлов зачастую становятся основными (Альтшулер, Ермаков, 1976; Назаров, 1980). Наиболее значимые антропогенные источники микроэлементов для почв – промышленные удобрения, сельскохозяйственные химикаты, сточные воды, ирригационные воды, осадения из атмосферы промышленных, городских и транспортных выбросов (Нейтрализация..., 2008; Adriano, 1996). Энергетические и нефтехимические комплексы выбрасывают в атмосферу окислы алюминия, железа, марганца, отходы металлургических производств содержат свинец, хром, марганец, отходы металлообрабатывающих заводов – свинец, цинк, никель, медь, марганец, хром (Ильин, 1991; Сериков, 1991; Nriagu, 1988). Автомобильный и железнодорожный транспорт способствуют накоплению в почвах свинца, меди, никеля, цинка и других токсикантов. Выделенные однажды, микроэлементы могут переноситься на далекие расстояния и в газообразной форме и в качестве пыли, что достаточно сложно контролировать и оценивать (Senesi, 1999).

В Карелии главными источниками загрязнения почв выступают промышленные предприятия и транспорт. Основная часть выбросов (до 80 %) приходится на промышленные центры – Костомукшу, Кондопогу, Петрозаводск, Сегежу, Питкяранту, Надвоицы (в основном целлюлозно-бумажные, деревоперерабатывающие и металлургические производства). Главные виды загрязнения атмосферы и почв – это двуокись серы (56 %), пылевые выбросы (21 %), окись углерода (16 %), двуокись азота (5 %), в состав данных выбросов входят тяжелые металлы (2 %). Из годового объема выпадающей на территорию Карелии серы (70 тыс. т) более половины поступает с прилегающих территорий: Архангельской области (23 %), Санкт-Петербурга и Ленинградской области (6 %), Мурманской области (6 %) и других регионов (17 %). Кроме того, из Финляндии, Швеции, Германии, Польши на территорию Карелии выпадает 14,8 тыс. т серы в год, тогда как сама республика «экспортирует» в эти страны 4,1 тыс. т (Федорец и др., 2008).

Изучение особенностей содержания тяжелых металлов-микроэлементов в почвах имеет длительную историю. До середины XX в. исследования были направлены на выявление географических закономерностей и региональных особенностей содержания микроэлементов в горных породах, почвах, растениях (Вернадский, 1936; Виноградов, 1957, 1962; Добровольский, 1980, 1983, 1997; Зырин, 1968; Ковда и др., 1959; Микроэлементы..., 1973, 1981; Сеничкина, Абашеева, 1986). Начиная с 1933 г. микроэлементные исследования почв Карелии проводились М. А. Тойкка, определявшим содержание некоторых химических элементов в шунгите для использования его в качестве удобрений (Тойкка, 1946). В дальнейшем его работы были расширены, в частности, изучались микроэлементы в шунгитовых почвах (Тойкка, 1958). С 1956 г. микроэлементными исследованиями почв Карелии занимались сотрудники кафедры неорганической химии Петрозаводского государственного университета – Е. М. Перевозчикова, Т. А. Ширяева, Т. И. Левкина под руководством М. А. Тойкка (Перевозчикова, Крохина, 1979; Перевозчикова и др., 1974; Тойкка и др., 1970, 1973; Тойкка, Сахаров, 1965; Ширяева, 1982). Одновременно проводились исследования по выявлению особенностей содержания мик-

роэлементов в различных объектах природы Карелии – водах, донных осадках, почвообразующих и горных породах, растениях (Володин, Тойкка, 1965; Онегина, Тойкка, 1976; Перевозчикова, 1966; Перевозчикова и др., 1974; Тойкка, 1971).

На современном этапе большое внимание исследователи уделяют выявлению интенсивности накопления тяжелых металлов-микроэлементов в почвах разного генезиса, фракционному составу их соединений, миграции и трансформации в пределах почвенного профиля. Во многих работах, в том числе и наших (Никонов и др., 1994; Переверзев и др., 2002; Федорец и др., 2004; Fedorets, 2003), было показано, что автоморфные почвы наследуют валовое количество тяжелых металлов от породы, на которой они сформировались. В процессе почвообразования происходит их перераспределение в почвенном профиле, в частности, для лесных таежных почв характерна биогенная аккумуляция тяжелых металлов в лесной подстилке, которая служит геохимическим барьером на пути продвижения аэротехногенных загрязнителей в более глубокие слои почвы и в грунтовые воды. Таким образом, в зоне интенсивного выпадения аэрополлютантов наибольшую нагрузку испытывает самый верхний слой органогенного горизонта, где накапливаются тяжелые металлы и происходят основные процессы трансформации (Никонов и др., 1994).

В связи с развитием промышленности и глобальным техногенным загрязнением окружающей среды наибольшее внимание стали привлекать аномалии микроэлементов-тяжелых металлов, имеющих индустриальное происхождение (Алексеев, 2013; Герасимова и др., 2003; Елькина, Безносилов, 1996; Елькина и др., 2002; Сает и др., 1990; Сутурин, 1990; Lacatusu, 2000; Nriagu, 1988). На территории Карелии наибольший интерес представляет изучение загрязнения территории, прилегающей к Костомукшского ГОКу как самому крупному источнику загрязнения – 62,3 % от объема валовых выбросов по республике (Государственный доклад..., 2014).

Увеличение антропогенной нагрузки на окружающую среду особенно проявляется на урбанизированных территориях. В настоящее время проведены исследования содержания тяжелых металлов в почвах различных городов России, в частности, на



территориях северных и северо-западных регионов (Горький, 2007; Дымов и др., 2013; Коробицина и др., 2013; Попова, Пилюгина, 2009; Рыбаков и др., 2013; Федорец, Медведева, 2005). Авторы отмечают высокие концентрации свинца, меди, цинка и никеля в городских почвах, а также в отдельных случаях мышьяка и ртути. По данным Н. Г. Федорец и М. В. Медведевой (2005), в почвах центральных районов г. Петрозаводска выявлены высокие значения содержания свинца, никеля, цинка, меди и марганца по отношению к ПДК. Были получены данные о содержании тяжелых металлов в почвах города в зависимости от категории землепользования (Ахметова, Новиков, 2014; Новиков, 2014а, б, 2015).

Комплексный анализ состояния почв, подверженных воздействию аэрополлютантов, предполагает исследование микробиоты как главной составляющей живой части почвы (Звягинцев, 1987). Микроорганизмы быстро реагируют на изменения почвенно-химических условий, поэтому являются одним из ключевых объектов экологического мониторинга (Гузов, Левин, 1991). Структурно-функциональная перестройка микробиоценоза почв, находящихся в условиях аэротехногенного загрязнения, хорошо диагностируется изменением численности и состава бактерий группы сапротрофов, бактерий-олиготрофов, таксономического разнообразия микроскопических грибов (Артамонова, 2002; Евдокимова, 1995; Марфенина, 2001; Скворцова, Якушкина, 1980). По ответной реакции микробного сообщества можно выявить уровень загрязнения почв тяжелыми металлами (Гузов, Левин, 1991; Евдокимова, 1995), что позволяет произвести реконструкцию почв на участке, находящемся в зоне техногенеза.

Проблема нормирования содержания тяжелых металлов в почве, а точнее, установления предельно допустимых концентраций (ПДК) довольно неоднозначна и активно обсуждаема. Используемая система ПДК считается исследователями несовершенной, ее следует рассматривать как систему непостоянных относительных величин, зависящую от почвенно-экологических факторов в конкретном регионе, ввиду чего невозможно разработать единые значения ПДК для различных регионов (Елькина, 2007; Ильин, 1985, 1987; Нейтрализация..., 2008; Смагин, 2013; Яшин и др., 2003).

В связи с этим важной задачей при изучении загрязнения почвы тяжелыми металлами является установление их содержания в природных объектах, не испытывающих антропогенного воздействия. Определению фоновых количественных показателей содержания тяжелых металлов в почвах посвящено много отечественных и зарубежных исследований (Добровольский, 1997; Ильин, 2002; Ильин, Сысо, 2001; Протасова, 2003; Протасова, Беляев, 2000; ISO..., 1996; Rawling et al., 2002; Tobias et al., 1997). В конце 1990-х гг. на территории Карелии Институтом леса КарНЦ РАН в рамках международного проекта «Atmospheric heavy metal deposition in Europe using bryophytes» изучалось загрязнение тяжелыми металлами, оксидами азота и серы мхов, лесной подстилки и минеральных горизонтов лесных почв региона. Проведенные исследования позволили выявить специфику и интенсивность накопления изучаемых металлов и установить региональные фоновые уровни концентрации тяжелых металлов и серы во мхах, лесных подстилках и минеральных горизонтах почв республики (Федорец и др., 1998, 2008).

Таким образом, проблема загрязнения почв тяжелыми металлами является весьма актуальной. Фундаментальные и прикладные исследования природных и антропогенных факторов, определяющих содержание и перераспределение химических элементов-загрязнителей, вносят существенный вклад в ее раскрытие. Только на основе этих исследований можно осуществлять необходимые экологические мероприятия, решать практические почвенно-агрохимические задачи.

## **Глава 2. ФОНОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ПОЧВ В КАРЕЛИИ**

### **Chapter 2. BACKGROUND MONITORING OF FOREST SOILS IN KARELIA**

Фоновый мониторинг означает наблюдение за явлениями и процессами, происходящими в окружающей среде, минимально затронутой вмешательством человека, например, на особо охраняемых природных территориях. Цель его проведения ориентирована на получение информации о состоянии природной среды, на основании которой проводятся оценки и прогноз изменения этого состояния под влиянием антропогенных факторов. Организация и осуществление почвенного мониторинга необходимы для выполнения задач охраны природных ресурсов, текущих и долгосрочных прогнозов рационального землепользования. Получение информации о фоновом загрязнении окружающей природной среды – это неотъемлемая составная часть программы «Наблюдение за планетой», принятой Комитетом ООН по окружающей среде.

Почва – индикатор многолетних природных процессов, и ее состояние – это результат длительного воздействия разнообразных источников загрязнения. Поэтому почвенные исследования на особо охраняемых территориях имеют большое значение для определения изменений в окружающей природной среде под усиливающимся антропогенным воздействием (Федорец, 1999).

## **2.1. Фоновый экологический мониторинг лесных почв в северотаежной подзоне Карелии (заповедник «Костомукшский»)**

## **2.1. Background ecological monitoring of forest soils in the north-taiga subzone of Karelia (Kostomukshsky nature reserve)**

В северотаежной подзоне Карелии на территории заповедника «Костомукшский» в различных типах хвойных лесов организован почвенный мониторинг. Его целью является оценка исходного состояния наиболее распространенных на территории республики типов почв и выявление возможных негативных последствий антропогенной деятельности.

В северо-восточной части заповедника подобраны участки сосновых и еловых древостоев, не затронутых пожарами и хозяйственной деятельностью, чистые по составу пород или с небольшой примесью (до 3 ед.), с полнотой 0,6 и выше. Сосновые и еловые древостои подбирались по характеру увлажнения и трофности. На отобранных участках заложены пробные площади и проведена перечислительная таксация древостоя (табл. 2.1.1). Пробные площади имеют прямоугольную форму, размер их устанавливался с таким расчетом, чтобы количество деревьев основного элемента леса было в пределах 250–300 шт. Таксационная характеристика насаждений определялась принятыми в лесной таксации методами (Анучин, 1971; Третьяков и др., 1965; Тюрин, 1945).

Учетные деревья выбирались по ступеням толщины в количестве 15–20 шт. на каждой пробной площади. У каждого дерева замерялась высота (высотомером), возраст (возрастным буравом) и диаметр на высоте груди. Диаметр среднего дерева насаждений устанавливался по сумме площадей сечений древесного ствола (Третьяков и др., 1965). Высота древостоев определялась по кривой высот, построенной по данным учетных деревьев. Отмечалось наличие сухостоя и захламленности.

В результате обработки полученных данных получена таксационная характеристика древостоев, которая включает в

себя: тип леса, состав по породам, возраст, средняя высота и диаметр, полнота, бонитет, запас в м<sup>3</sup> на 1 га, положение в рельефе, характеристика подроста, подлеска, напочвенного покрова, II яруса (при наличии), а также отмечены индивидуальные особенности каждого участка.

**Таблица 2.1.1.** Лесоводственно-таксационная характеристика насаждений на пробных площадях заповедника «Костомукшский»\*

**Table 2.1.1.** Mensurational description of forest stands in sample plots in the Kostomukshsky reserve

ПП	Состав по породам	Возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Количество стволов, шт./га	Сумма площадей сечений, м <sup>2</sup>	Полнота	Запас, м <sup>3</sup>	Класс бонитета	Тип леса
1	10 СедЕБ	90	17,8	16,9	1030	23,21	0,7	237	III,7	С. ворон.-брусн.
2	10С + Б	85	18,1	16,6	1165	22,43	0,7	213	III,4	С. ворон.-чернич.
3	6Е2С2Б едОс	100	19,8	22,3	750	27,56	0,8	259	III,3	Е. чернич. влажный
4	10ЕедБ	200	23,8	28,1	625	38,58	1,0	426	III,3	Е. приручейный

\* Данные Ю. В. Преснухина.

### *Пробная площадь 1 (ПП 1). Сосняк воронично-брусничный*

Чистое сосновое насаждение в возрасте 90 лет с небольшой примесью ели и березы. Единично в составе присутствует сосна в возрасте 270 лет, которая сохранилась после сплошной вырубki древостоя. Мезорельеф ровный, микрорельеф выражен слабо. Прослеживаются следы пожара, прошедшего после вырубki древостоя. Распределение деревьев по ступеням толщины близко к нормальному. Полнота древостоя равномерная. Насаждение высокополнотное (0,7), произрастает по III,7 классу бонитета.

Подрост представлен елью, березой и осинкой. Еловый подрост в количестве 280 шт./га по площади расположен неравномерно, его высота колеблется от 0,5 до 5 м, средние



показатели – около 2 м. Подлесок представлен единично рябиновой и можжевельником.

Сухостой составляет около 10 % от запаса древостоя. На него приходится около 25 % стволов от их количества на 1 га. Основное количество усохших деревьев (75 %) приходится на ступени толщины 8–12 см при среднем диаметре древостоя 16,9 см.

Почва – подзол иллювиально-железистый пылевато-связно-песчаный на моренных отложениях, имеет следующее морфологическое строение:

A0 – 0–5 см, лесная подстилка, слаборазложившаяся, рыхлая, бурая (10YR 3/2), угли (немного), пронизана корнями, переход резкий по структуре.

A2 – 5–10 (24) см, белесый (10YR6/1), уплотненный, увлажненный, песчаный, пронизан корнями растений, встречаются крупные валуны, переход по цвету языками. Там, где встречаются крупные валуны, A2 маломощен (1–2 см), под ними сразу начинается Bf.

Bf – 10 (24)–20 (35) см, светлоохристый (10YR5/4), уплотненный, увлажненный, пронизан сосущими корнями растений, встречаются крупные валуны по всему горизонту (на которых образуется ржавый налет), переход в нижележащий горизонт языковатый.

B2 – 20 (35)–33 (40) см, серовато-желтый (10YR6/3), песчаный, увлажненный, уплотненный, гравия меньше, чем в вышележащем горизонте, переход плавный по цвету и степени сортировки материала.

B3 – 33 (40)–57 (62) см, желто-оливковый (10YR6/4), уплотненный, свежий, песчаный (плохо сортированный), переход по цвету и плотности.

BC – 57 (62)–80 см, более светлый, чем B3 (2.5Y7/2), менее плотный, супесчаный, хуже сортированный, переход по плотности и цвету от оливкового до более светлого.

C – глубже 80 см, уплотненный, песчаный (плохо сортированный), палевый (2.5YR4/4), свежий, пятна окиси железа по всему горизонту.

### *ПП 2. Сосняк воронично-черничный*

Чистое сосновое насаждение в возрасте 85 лет с небольшой примесью березы. Единично встречается сосна в возрасте более

270 лет. Древостой расположен на вершине пологого северо-западного склона. Микрорельеф выражен. Отмечаются следы пожара, прошедшего после вырубki древостоя. Распределение деревьев по ступеням толщины приближается к нормальному. Полнота равномерная. Насаждение высокополнотное (0,7), произрастает по III,4 классу бонитета.

Подрост представлен елью и березой. Еловый подрост (370 шт./га) расположен куртинно. Минимальная высота его составляет 0,5 м, максимальная около 5 м, средняя высота находится в пределах 2 м. Подлесок редкий, представлен рябиной и можжевельником.

Сухостой составляет около 15 % от запаса древостоя. От общего количества стволов на его долю приходится 28 %. Основное количество усохших деревьев (75 %), как и в случае сосняка брусничного, приходится на ступени толщины 8–12 см, при среднем диаметре древостоя 16,6 см.

Почва – подзол иллювиально-гумусово-железистый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях, имеет следующее морфологическое строение:

A0 – 0–6 см, лесная подстилка, бурая (10YR3/2), слаборазложившаяся, состоит из опада сосны – хвои, веток и отмерших кустарничков – черники, пронизан корнями кустарничков, рыхлый, переход по структуре, на границе со следующим горизонтом угли.

A2 – 6–12 (18) см, белесый (10YR6/1), пылевато-песчаный связный, хорошо сортированный, уплотненный, увлажненный, на границе с A0 потеки гумуса, переход по плотности, цвету, языками.

Bhf – 12 (18)–24 (26) см, темно-рыжий (10YR4/4), рыхлый, увлажненный, пылевато-песчаный хорошо сортированный, пронизан корнями, переход в следующий горизонт по плотности и цвету постепенный.

Bf – 24 (26)–34 (35) см, желтый (10YR6/3), пылевато-песчаный связный, плотный, свежий, на границе со следующим горизонтом вкрапления мелкого гравия, крупные корни сосны, переход по плотности и сортировке материала.

B3 34 (35)–51 см – палевый (10YR6/4), пылевато-песчаный связный, сортирован хуже предыдущего горизонта, уплотненный, свежий, переход по плотности и сортировке.

BC – 51–72 см, окраска та же, что и в предыдущем горизонте (10YR6/4), плохо сортированный песок, уплотненный, свежий, переход по плотности и сортировке.

C – глубже 72 см, окраска та же, что и в вышележащем горизонте (10YR6/4), более рыхлый, чем BC, свежий, хуже сортированный песок, чем в BC.

### *ПП 3. Ельник черничный влажный*

Расположен у подножия гряды на небольшом северном склоне (5–7 %). Микрорельеф выражен. В составе присутствует сосна и береза в равных количествах (по 2 единицы), осина встречается единично. Древостой относительно одновозрастный – возраст ели колеблется в пределах класса (90–110 лет). В небольшом количестве встречается ель из подроста. Распределение деревьев по ступеням толщины приближается к нормальному. Насаждение высокополнотное (0,8), полнота неравномерная, прослеживается небольшая выборочная рубка в пределах 5–10 % по запасу. Условия произрастания соответствуют данному типу леса, древостой развивается по III,3 классу бонитета.

Подрост ели немногочисленный, около 300 шт./га, жизнеспособный, 1,5–6 м высотой, по площади расположен неравномерно.

Подлесок средней густоты представлен рябиной, можжевельником, ивой, ольхой серой.

Сухостой составляет около 10 % по запасу и почти столько же по количеству стволов. Основное количество сухостоя приходится на долю березы, которая по возрасту находится на пределе своих биологических возможностей и находится в начальной стадии отмирания.

Почва – подзол иллювиально-железисто-гумусовый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях, имеет следующее морфологическое строение профиля:

A0' – 0–3 см, лесная подстилка, слаборазложившаяся, бурая (10YR3/2), рыхлая, влажная, состоит из елового опада – хвои, веток, густо пронизан корнями, переход по степени разложения.

A0'' – 3–10 см, лесная подстилка, среднеразложившаяся, темно-бурая (10YR2/1), рыхлая, влажная, пронизана корнями, переход в нижележащий горизонт резкий.

A2 – 10–20 (30) см, белесый (10YR6/1), уплотненный, влажный, на границе с лесной подстилкой затеки гумуса и угли, много валунов и гравия, пылевато-песчаный, переход в следующий горизонт языками по цвету и плотности, механическому составу.

Bfh – 20 (30)–35 (46) см, темно-рыжий (10YR3/3), плотный, пылевато-песчаный рыхлый, плохо сортированный, много валунов и гравия, пронизанный корнями, переход по цвету, степени сортировки и плотности неровной линией.

Bf – 35 (46)–54 (60) см, темно-желтый (10YR5/4), пылевато-песчаный связный, пронизан корнями, переход по механическому составу и сортировке.

BC – 54 (60)–96 см, оливковый с ржавыми пятнами (10YR5/3), плохо сортированный, уплотненный, пылевато-песчаный, переход ровный по плотности.

C – глубже 96 см, сизоватый (10YR6/4), пылевато-песчаный, уплотненный, меньше гравия и валунов, имеются прослойки окиси железа.

#### *ПП 4. Ельник травяно-хвощово-сфагновый (приручейный)*

Пробная площадь расположена на ровном участке с уклоном в сторону озера Каменного. По краю пробной площади протекает ручей. По почвенному покрову ельник относится к травяно-хвощово-сфагновому типу леса, однако, несмотря на избыточное увлажнение, по условиям местопроизрастания он ближе к приручейному типу, что обусловлено хорошим дренажем и высокой проточностью грунтовых вод.

Чистое еловое насаждение с небольшой примесью березы. Древостой разновозрастный, встречаются особи ели от 110 до 240 лет, четкого разделения по поколениям нет. Наиболее многочисленны деревья в возрасте 200–225 лет. Полнота (1,0) равномерная, следы выборочной рубки (5–10 %), распределение по ступеням толщины приближается к нормальному. Производительность ельника для данного района высокая, древостой произрастает по III,3 классу бонитета.

Подлесок средней густоты представлен двумя видами – рябиной и можжевельником.

Сухостой составляет 18 % по количеству стволов и 5 % по запасу, так как представлен в основном наиболее тонкими ступенями

толщины, ниже среднего диаметра (28,1 см). Захламленность 10–15 м<sup>3</sup>/га.

Почва – торфянисто-перегноино-глеевая пылевато-песчаная на моренных отложениях, имеет следующее морфологическое строение профиля:

T0 – 0–4 см, оторфованная подстилка, темно-бурая (10YR3/2), плохо разложившаяся, сырая, рыхлая, состоит из мха, переход по структуре ровный.

T0A1 – 4–9 см, органоминеральный горизонт (больше органический), черно-бурый (10YR2/1), уплотненный, сырой, переход ровный по структуре.

Bfh – 9–27 см, ржаво-рыжий (10YR4/4), пылевато-песчаный, уплотненный, включения корней, влажный, переход по плотности и окраске, встречаются неразложившиеся корни.

B2 – 27–44, серый (10YR5/2), песчаный (крупный песок), сырой, рыхлый.

BC1 – 44–54 см, оливковый (10YR5/3), ржавые пятна, пылевато-песчаный, плотный, сырой, переход по плотности и цвету.

BC2g – 54–61 см, сизый (10YR6/3), пылевато-песчаный, более плотный, чем предыдущий горизонт, переход по плотности.

Cg – глубже 61 см, сизый (10YR6/3), крупнопесчаный, плохо сортированный, рыхлый, мокрый.

На пробных площадях закладывались почвенные разрезы, проводилось их морфологическое описание, определение цвета почвы по Манселлу. Почвенные образцы отбирали по генетическим горизонтам, определяли плотность почвы, ее гранулометрический состав, валовой химический состав, кислотно-щелочные свойства, содержание гумуса, элементов питания (общие и подвижные формы). Исследования проводились по общепринятым методикам (Агрохимические методы..., 1975). Также методом атомно-адсорбционной спектрофотометрии было определено валовое содержание тяжелых металлов. Количество подвижных соединений тяжелых металлов устанавливали в различных вытяжках: медь, цинк, никель, хром, кобальт, марганец – в вытяжке аммонийно-ацетатного буфера при pH 4,8, кадмий, свинец и железо – в 1N растворе хлористого аммония (Руководство..., 1993).



### Гранулометрический состав почв

Исследования гранулометрического состава почв на пробных площадях свидетельствуют о том, что все почвы песчаные (табл. 2.1.2), так как сформировались на песчаных моренных отложениях. При этом следует отметить, что под сосновыми и еловыми лесами почвы автоморфного ряда имеют сходный гранулометрический состав, все они пылевато-связнопесчаные с включениями валунов. При этом содержание физической глины и илистой фракции в верхних почвенных горизонтах выше в подзолах иллювиально-гумусовых под ельниками по сравнению с подзолами под сосняками. Незначительное утяжеление гранулометрического состава все же сказалось на физических и физико-химических свойствах почв, что способствовало заселению данных участков разными хвойными породами. Распределение по профилю подзолов различных гранулометрических фракций аналогично, но все же распределение илистой фракции по профилю, свидетельствующее о протекании подзолообразовательного процесса в различных родах подзолов в северотаежной подзоне, различается. Особенно показателен характер накопления илистых частиц в горизонтах A2 и Bf, Bhf, Bfh. В подзолах иллювиально-железистых количество ила выше в горизонте A2, в подзолах иллювиально-гумусово-железистых разница значительно меньше, а в подзолах иллювиально-железисто-гумусовых накопление ила одинаково. Это свидетельствует о различном характере передвижения илистых частиц по почвенному профилю и различной интенсивности процесса лессивирования почвенного профиля в подзолах в зависимости от их родовой принадлежности.

В целом низкое содержание в почвах тонкопылеватых и илистых частиц свидетельствует о низкой интенсивности разрушения почвенных минералов и глинообразования.

### Валовой химический состав почв

Исследованные почвы формируются на кислых моренных отложениях, содержание кремнезема в них выше 75 %, что не могло не сказаться на сформировавшихся почвах, содержащих  $\text{SiO}_2$  в минеральных горизонтах от 66,3 до 81,3 % (табл. 2.1.3).

**Таблица 2.1.2.** Гранулометрический состав почв заповедника  
«Костомукшский», %

**Table 2.1.2.** Particle size composition of Kostomukshsky reserve soils, %

Горизонт, глубина, см	Размер фракций, мм						
	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01
ПП 1. Подзол иллювиально-железистый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Сосняк воронично-брусничный							
A2 5–10 (24)	45,9	22,8	23,6	3,8	3,4	0,5	7,7
Bf 10 (24)– 20 (35)	67,2	25,6	6,2	0,2	0,4	0,4	1,0
B2 20 (35)– 33 (40)	37,8	29,3	27,8	2,5	2,1	0,5	5,1
B3 33 (40)– 57 (62)	35,0	36,1	20,7	4,3	3,8	0,1	8,2
BC 57 (62)–80	26,2	30,4	32,8	4,8	5,5	0,3	10,6
ПП 2. Подзол иллювиально-гумусово-железистый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Сосняк воронично-черничный							
A2 6–12	35,9	37,4	21,6	2,3	0,9	1,9	5,1
Bhf 12 (18)– 24 (26)	53,2	31,5	14,2	0,3	0,4	0,4	1,1
B2 24 (26)– 34 (35)	27,4	47,4	21,1	2,9	1,1	0,1	7,0
B3 34 (35)–51	46,0	28,0	19,6	3,7	1,7	1,0	6,4
BC 51–72	27,3	37,8	26,0	4,8	2,9	1,2	8,9
C 72–глубже	28,2	39,9	22,9	5,7	2,3	1,0	9,0
ПП 3. Подзол иллювиально-железисто-гумусовый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Ельник черничный влажный							
A2 10–20 (30)	28,2	39,2	24,4	4,2	2,3	1,7	8,2
Bfh 20 (30)– 35 (46)	48,9	33,2	14,1	1,9	0,2	1,7	3,8
Bf 35 (46)– 54 (60)	42,9	30,1	21,2	3,6	1,0	1,2	5,8
C 54 (60)–96	50,9	25,4	16,0	3,6	2,2	1,9	7,7
C 96–глубже	19,4	51,5	20,3	4,7	2,6	1,5	8,8
ПП 4. Торфянисто-перегнойно-глеевая пылевато-песчаная на моренных отложениях. Ельник травяно-хвощово-сфагновый							
Bfh 9–27	54,4	30,8	9,7	1,9	0,6	2,6	5,1
B2 27–44	84,8	8,2	3,5	0,8	0,7	2,0	3,5
BC1 44–54	26,6	45,9	19,8	2,6	1,7	3,4	7,7
BC2g 54–61	19,7	46,6	24,8	2,7	2,6	3,6	8,9
Cg 61–глубже	83,4	11,3	3,0	0,1	1,1	1,2	2,3

**Таблица 2.1.3.** Валовой химический состав почв хвойных лесов заповедника «Костомукшский», % на прокаленную почву  
**Table 2.1.3.** Bulk chemical composition of coniferous forest soils in Kostomukshsky reserve, % of ignited soil

Горизонт, глубина, см	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
ПП 1. Подзол иллювиально-железистый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Сосняк воронично-брусничный										
A0 0–5	80,33	0,52	3,22	2,85	0,200	2,00	3,62	2,41	2,24	0,98
A2 5–10 (24)	81,08	0,22	8,14	1,67	0,017	0,42	1,24	2,32	1,71	0,06
Bf 10 (24)–20 (35)	81,60	0,29	9,27	2,18	0,028	0,65	1,37	2,62	1,77	0,15
B2 20 (35)–33 (40)	81,05	0,14	9,43	1,67	0,023	0,69	1,17	2,93	1,72	0,05
B3 33 (40)–57 (62)	80,84	0,16	9,32	1,88	0,017	0,63	1,32	2,92	1,73	0,07
BC 57 (62)–80	74,22	0,48	9,21	1,10	0,081	0,92	1,35	2,76	1,71	0,14
ПП 2. Подзол иллювиально-гумусово-железистый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Сосняк воронично-черничный										
A0 0–6	62,76	0,53	4,34	4,53	0,82	6,18	5,13	3,03	3,29	1,58
A2 6–12	79,42	0,21	10,48	1,04	0,014	0,58	1,54	3,27	1,90	0,05
Bhf 12 (18)–24 (26)	68,50	0,39	17,51	4,34	0,037	0,81	2,57	3,89	1,53	0,25
B2 24 (26)–34 (35)	71,43	0,01	14,24	2,52	0,037	1,18	2,95	4,23	1,71	0,10
B3 34 (35)–51	72,70	0,28	13,24	2,50	0,038	1,10	2,93	4,18	1,74	0,10
BC 51–72	72,20	0,34	13,41	2,82	0,040	1,10	3,22	4,00	1,67	0,11
C 72–глубже	71,82	0,38	13,53	2,71	0,042	1,50	3,22	4,06	1,82	0,15
ПП 3. Подзол иллювиально-железисто-гумусовый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Ельник черничный влажный										
A0 0–10	66,29	0,49	8,15	5,56	0,35	2,72	5,68	2,96	5,80	2,10
A2 10–20 (30)	75,44	0,31	12,64	1,46	0,025	0,74	2,34	4,00	1,74	0,02
Bfh 20 (30)–35 (46)	67,7	0,42	16,88	4,91	0,04	1,35	2,85	3,88	1,61	0,20
Bf 35 (46)–54 (60)	69,83	0,34	14,85	2,94	0,037	1,38	2,80	4,08	1,73	0,12
BC 54 (60)–96	71,46	0,38	13,47	2,71	0,041	1,26	3,08	4,05	1,76	0,14
C 96–глубже	72,60	0,38	12,85	2,93	0,044	1,27	2,94	3,79	1,90	0,18
ПП 4. Торфянисто-перегнойно-глеевая пылевато-песчаная на моренных отложениях. Ельник хвощово-сфагновый										
T0 0–4	66,18	0,40	10,45	7,23	2,11	1,33	4,28	3,45	1,68	0,08
T0A1 4–9	67,67	0,68	14,0	6,04	0,27	2,07	3,19	3,65	1,97	0,38
Bfh 9–27	74,01	0,16	10,45	3,16	0,204	2,19	2,14	4,07	1,61	0,06
B2 27–44	73,62	0,23	11,90	2,61	0,061	0,95	2,49	3,76	1,59	0,10
BC1 44–54	69,51	0,26	12,52	3,36	0,120	1,07	2,51	3,77	1,69	0,14

**Окончание табл. 2.1.3**

Горизонт, глубина, см	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
BC2g 54–61	71,00	0,30	12,30	3,03	0,056	1,37	2,64	3,70	1,61	0,11
Cg 61–глубже	74,22	0,13	13,01	1,56	0,048	0,73	2,27	4,37	1,70	0,07
Песок морен- ный валунный	75,02	0,57	11,19	3,75	0,09	2,05	1,40	2,54	1,68	0,19

На втором месте по количеству в почвообразующей породе среди определенных элементов находится алюминий – 11,2 %, то же касается и почв, содержащих 8,1–17,5 % оксида алюминия. Таким образом, суммарное содержание оксидов алюминия и кремния в почве составляет более 90 % от валового количества элементов. На все остальные элементы приходится около 10 %, из них больше всего содержится калия и натрия. Для всех исследованных почв отмечено накопление биофильных элементов, особенно кальция и калия, в лесных подстилах и органогенных горизонтах гидроморфных почв.

Количественное перераспределение химических элементов и глубина миграции их по профилю определяются степенью увлажнения почвы. Процесс разрушения минеральной части почв снижается по мере нарастания увлажнения. В подзолах иллювиально-железистых сосняка воронично-брусничного содержание кремнезема в подзолистом горизонте увеличивается по сравнению с почвообразующей породой на 6 %, в то время как в подзолах иллювиально-гумусово-железистых сосняка воронично-черничного – на 4 %, в подзолах иллювиально-железисто-гумусовых ельника черничного влажного количество кремнекислоты в горизонте A2 равняется его количеству в песчаной морене. Иллювиальный горизонт подзолов иллювиально-гумусово-железистого и иллювиально-железисто-гумусового обеднен SiO<sub>2</sub> по сравнению с почвообразующей породой.

Интенсивность профильного изменения химического состава почв хорошо иллюстрируется величинами коэффициентов дифференциации, т. е. отношением содержания элемента в иллювиальном к содержанию его в подзолистом горизонте. Элювиально-иллювиальный характер распределения по профилю присущ полуторным оксидам алюминия и железа, в то время как оксид кремния накапливается в элювиальном горизонте (кроме подзола иллювиально-желе-

зистого, где отмечена тенденция элювиально-иллювиального распределения оксида кремния). Коэффициент дифференциации  $\text{SiO}_2$  в исследуемых подзолах меньше единицы, лишь для подзола иллювиально-железистого этот показатель близок к единице.

В подзолах иллювиально-железистых обогащение иллювиального горизонта железом по сравнению с элювиальным составляет 0,51 %, в подзолах иллювиально-гумусово-железистых – 3,3 %, в подзолах иллювиально-железисто-гумусовых – 3,45 %. Перераспределение по профилю оксидов железа усиливается по мере увеличения степени увлажнения почвы. Однако обогащения железом почв по сравнению с материнской породой не происходит. Как уже говорилось, в подзолистых почвах происходит перераспределение содержания оксидов алюминия по профилю. Обогащения им подзолов иллювиально-железистых по сравнению с материнской породой не отмечено, а в подзолах иллювиально-гумусово-железистых и подзолах иллювиально-железисто-гумусовых выявлено накопление на 5–6 % по сравнению с материнской породой. Вынос подвижных соединений алюминия из подзолистого в иллювиальные горизонты увеличивается по мере нарастания увлажнения от сосняка воронично-брусничного к сосняку воронично-черничному, соответственно, на 1,1–7,0 %. Этот процесс несколько замедляется в подзолах иллювиально-железисто-гумусовых ельника черничного влажного.

Таким образом, процессом подзолообразования охвачена верхняя толща подзолов, причем интенсивность процесса зависит от степени увлажнения. Следует отметить, что различные составляющие процесса подзолообразования ведут себя аналогично: вынос илистых частиц увеличивается по мере нарастания увлажнения, так же ведут себя и соединения железа. Соединения алюминия наиболее активно мигрируют при среднем уровне увлажнения почвы, который складывается в подзолах иллювиально-гумусово-железистых. Для кальция и магния песчаных подзолов характерен вынос из подзолистого горизонта и накопление в иллювиальном. Распределению натрия и калия свойственна та же тенденция, которая ослабевает с увеличением увлажнения почвы. Соединения калия не накапливаются в иллювиальном горизонте, а мигрируют на большую глубину. Содержание в почве щелочных и щелочноземельных металлов невысокое.



### Кислотность и степень насыщенности основаниями почв

Песчаные подзолы сосновых лесов характеризуются сильнокислой реакцией (табл. 2.1.4). Наиболее кислыми являются лесные подстилки, где pH солевой вытяжки составляет в ряде случаев ниже 3,0, вниз по профилю кислотность уменьшается. Высокую кислотность лесных подстилок связывают с образованием в них гумусовых кислот, особенно фульвокислот, которые их подкисляют. Для исследованных почв можно связать подкисление подстилок с недостатком биогенного кальция.

Определение актуальной кислотности почв показало, что она отличается от обменной в лесных подстилках подзолов и органо-генных горизонтах торфяной почвы переходного типа на одну единицу pH. В минеральных горизонтах это различие также близко к единице. В торфянисто-перегнойно-глеевой этот показатель в отдельных горизонтах меньше единицы.

Кислотность лесных подстилок подзолов различается между собой в зависимости от типа леса. Наибольшая обменная кислотность характерна для подстилок в сосняках и ельниках черничного типа (pH 2,7–2,8). В более сухих условиях кислотность подстилки (сосняк брусничный) ниже и показатель pH составляет 3,2. В переувлажненных типах леса кислотность подстилок сильно различается. Сильнокислые почвы – в сосняке кустарничково-сфагновом, в то время как в ельнике приручейном кислотность значительно ниже (pH 4,2). В этом случае прослеживается зависимость кислотности от запасов биогенного кальция в почве (Пономарева, 1955). Именно в почвах этого типа леса содержится наибольшее количество подвижных соединений кальция.

Песчаные подзолы характеризуются малой емкостью поглощения, что связано с бедностью их илистыми частицами. В минеральных горизонтах она редко бывает выше 0,7–0,8 мг-экв./100 г (Морозова, Федорец, 1992). Наибольшая емкость поглощения оснований типична для органо-генных горизонтов всех исследованных почв. В минеральной части профиля подзолов наблюдается элювиально-иллювиальное распределение суммы поглощенных оснований (S) по профилю. Этот показатель больше в тех горизонтах, где выше содержание гумуса.

Для торфянисто-перегнойно-глеевой почвы также характерно резкое снижение суммы поглощенных оснований при переходе от органо-генных горизонтов к минеральным.

**Таблица 2.1.4.** Физико-химические свойства почв в различных типах хвойных лесов в северотаежной подзоне  
**Table 2.1.4.** Physicochemical properties of soils in different coniferous forest types in the mid-taiga subzone

Горизонт, глубина, см	pH		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	ГК	S	C	N
	H <sub>2</sub> O	KCl	мг/100 г		мг-экв./100 г		%	%
Подзол иллювиально-железистый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Сосняк воронично-брусничный								
A0 0–5	4,23	3,23	66,90	57,2	103,7	38,74	46,16	1,03
A2 5–10 (24)	3,72	3,60	16,10	3,69	2,23	0,30	0,51	0,02
Bf 10 (24)–20 (35)	4,54	3,91	68,50	3,99	3,76	7,25	0,53	0,02
B2 20 (35)–33 (40)	5,40	5,14	43,20	2,27	1,03	0,61	0,17	0,01
B3 33 (40)–57 (62)	5,07	4,96	82,00	2,86	0,84	0,60	0,17	0,03
BC 57 (62)–80	4,98	4,88	101,3	2,51	0,84	1,71	0,14	0,01
C 80–глубже	6,00	4,76	117,5	2,34	0,89	1,91	0,05	0,02
Подзол иллювиально-гумусово-железистый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Сосняк воронично-черничный								
A0 0–6	3,67	2,70	22,45	81,2	105,2	35,9	46,03	1,01
A2 6–12	4,57	3,46	8,60	1,65	3,09	0,40	0,45	0,03
Bhf 12 (18)–24 (26)	6,05	5,68	26,96	1,25	1,70	6,10	0,80	0,01
B2 24 (26)–34 (35)	6,28	5,32	48,54	1,31	0,96	1,01	0,26	0,03
B3 34 (35)–51	5,62	4,70	43,01	1,29	0,81	1,00	0,14	0,02
BC 51–72	5,80	4,75	60,24	1,07	0,95	1,81	0,07	0,03
C 72–глубже	4,86	4,50	34,09	0,91	0,70	3,21	0,24	0,01
Подзол иллювиально-железисто-гумусовый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Ельник черничный влажный								
A0 0–10	3,79	2,79	31,40	96,4	149,8	76,7	41,63	1,07
A2 10–20 (30)	4,20	4,76	9,00	1,97	3,48	0,27	0,29	0,02
Bfh 20 (30)–35 (46)	5,08	4,93	9,99	1,95	6,89	7,95	1,86	0,04
Bf 35 (46)–54 (60)	6,60	5,50	29,55	1,45	2,02	2,63	0,26	0,01
BC 54 (60)–96	5,20	4,83	30,10	1,14	1,87	6,63	0,08	0,02
C 96–глубже	5,63	4,86	28,49	0,89	1,76	5,82	0,13	0,01
Торфянисто-перегнойно-глеевая пылевато-песчаная на моренных отложениях. Ельник травяно-хвощово-сфагновый								
T0 0–4	4,80	4,16	18,82	89,06	74,58	56,7	32,16	0,98
T0A1 4–9	4,44	4,01	28,59	17,67	26,69	11,5	13,19	0,47
Bf 9–27	5,13	4,47	1,61	1,68	3,38	3,22	0,51	0,04
B2 27–44	5,49	4,49	5,42	1,30	3,66	2,81	0,78	0,04
BC1 44–54	4,76	4,64	17,80	0,77	5,80	5,06	1,69	0,04
BC2g 54–61	5,03	4,48	18,95	0,78	5,29	2,98	1,37	0,04
Cg 61–глубже	5,01	4,57	19,05	0,99	2,04	1,40	0,49	0,04

**Таблица 2.1.5.** Обменные катионы (мг-экв./100г а.-с.п.) и степень насыщенности почв основаниями (%)

**Table 2.1.5.** Cation exchange capacity (meq/100 g oven dry soil) and base saturation (%) of soils

Горизонт, глубина, см	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	V
Подзол иллювиально-железистый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Сосняк воронично-брусничный					
A0 0–5	0,97	0,55	1,73	0,61	27,20
A2 5–10 (24)	0,04	0,01	0,19	0,02	8,50
Bf 10 (24)–20 (35)	0,02	0,04	0,23	0,03	65,85
B2 20 (35)–33 (40)	0,01	0,05	0,25	0,03	37,20
B3 33 (40)–57 (62)	0,01	0,01	0,29	0,24	41,67
BC 57 (62)–80	0,00	0,01	0,22	0,02	67,06
C 80–глубже	0,01	0,01	0,87	0,03	68,20
Подзол иллювиально-гумусово-железистый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Сосняк воронично-черничный					
A0 0–6	0,23	0,30	1,38	0,22	25,60
A2 6–12	0,01	0,01	0,19	0,02	11,46
Bhf 12 (18)–24 (26)	0,02	0,01	0,24	0,03	69,32
B2 24 (26)–34 (35)	0,02	0,02	0,13	0,02	51,26
B3 34 (35)–51	0,02	0,01	0,18	0,02	55,25
BC 51–72	0,02	0,02	0,13	0,01	65,58
C 72–глубже	0,01	0,01	0,22	0,04	82,10
Подзол иллювиально-железисто-гумусовый пылевато-связнопесчаный на моренных отложениях. Ельник черничный влажный					
A0 0–10	0,99	0,43	11,22	0,61	33,93
A2 10–20 (30)	0,01	0,01	0,05	0,02	Не опр.
Bfh 20 (30)–35 (46)	0,00	0,001	0,00	0,00	53,57
Bf 35 (46)–54 (60)	0,19	0,11	0,85	0,30	56,56
BC 54 (60)–96	0,31	0,03	0,85	0,40	78,00
C 96–глубже	0,20	0,10	0,99	0,42	
Торфянисто-перегнойно-глеевая пылевато-песчаная на моренных отложениях. Ельник травяно-хвощово-сфагновый					
T0 0–4	1,63	0,46	14,85	2,31	43,18
T0A1 4–9	0,95	0,26	3,17	1,62	30,15
Bf 9–27	0,26	0,07	0,81	0,32	48,79
B2 27–44	0,22	0,10	1,03	0,45	43,43
BC1 44–54	0,40	0,06	1,03	0,37	46,59
BC2g 54–61	0,16	0,08	0,98	0,34	Не опр.
Cg 61–глубже	0,17	0,11	0,85	0,28	Не опр.

В подстилках подзолов среди поглощенных оснований (табл. 2.1.5) преобладает кальций, на втором месте – калий, в минеральных горизонтах – кальций и магний. В торфянисто-перегнойно-

глеевой почве среди поглощенных катионов также преобладают кальций и магний. Несмотря на значительное валовое содержание калия и натрия в минеральных горизонтах подзолов, этих элементов в поглощенном состоянии мало, что свидетельствует о слабом выветривании первичных минералов.

Степень насыщенности основаниями (V) всех исследованных почв низкая, в подстилках подзолов колеблется от 21 до 34 %, с глубиной возрастает. В торфянисто-перегнойно-глеевой почве отмечено монотонное распределение данного показателя по всему профилю. Для лесных подстилок прослеживается зависимость степени насыщенности основаниями поглощающего комплекса почв от типа леса и уровня увлажнения почвы.

Содержание углерода и элементов минерального питания в почвах

Песчаные подзолы, как правило, бедны органическим веществом. Для них характерно его накопление в верхней части профиля в виде лесной подстилки. Содержание органического вещества в пересчете на углерод в лесных подстилках подзолов сосновых и еловых лесов различается слабо и составляет 46,0–46,6 %. В гидроморфной почве ельника количество органического вещества в верхней части профиля составляет 32,2 % в пересчете на углерод (табл. 2.1.4). Распределение углерода по профилю почв различных типов различается: для подзолов характерно элювиально-иллювиальное распределение в минеральной части почвы, для торфянистой перегнойно-глеевой – убывание вниз по профилю.

Большинство лесных почв бедны доступным азотом и не обеспечивают в достаточной степени азотным питанием произрастающие на них насаждения. Существует тесная корреляционная связь накопления в почве азота и органического вещества. Содержания общего азота в подстилках исследуемых подзолов мало отличаются друг от друга, так как количество органического вещества в них близко. Характер распределения азота по профилю аналогичен распределению органического вещества. Расчет запасов азота в 25-см слое почв, включая подстилку, показывает, что количество азота возрастает с увеличением уровня увлажнения как в сосновых, так и в еловых биогеоценозах (табл. 2.1.6), при этом в почве ельников запасы его выше, чем в сосняках.

**Таблица 2.1.6.** Запасы элементов минерального питания в 25-см слое почв сосновых и еловых лесов (включая подстилку)

**Table 2.1.6.** Storage of mineral nutrients in the top 25 cm soil layer (including forest litter) of pine and spruce forests

Тип леса, почва	N вал., т/га	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ц/га	K <sub>2</sub> O, ц/га
Сосняк воронично-брусничный. Подзол иллювиально-железистый	0,8	9,8	1,1
Сосняк воронично-черничный. Подзол иллювиально-гумусово-железистый	0,9	3, 3	0,7
Ельник черничный влажный. Подзол иллювиально-железисто-гумусовый	1,1	1,9	1,1
Ельник травяно-хвощово-сфагновый. Торфянисто-перегнойно-глеевая	2,5	1,5	1,5

Проведенные ранее исследования показали, что не всегда существует прямая зависимость продуктивности насаждений от содержания общего и кислоторастворимого фосфора в почве. Это связано с закреплением подвижного фосфора в трудно-растворимые органоминеральные и минеральные комплексы с полуторными оксидами алюминия и железа, большим количеством которых отличаются подзолистые и болотно-подзолистые почвы. Подзолистые и болотно-подзолистые почвы бедны фосфором. Для подзолов характерна хорошо выраженная дифференциация почвенного профиля по содержанию общего и кислоторастворимого фосфора. В элювиальной части профиля количество фосфора в 1,5–3 раза ниже, чем в почвообразующей породе. Различия в содержании кислоторастворимых соединений фосфатов еще более существенные. Следует отметить, что наибольшее содержание фосфора характерно для почвообразующей породы, что свидетельствует о зависимости его накопления в профиле почвы в процессе почвообразования от обогащенности данным элементом материнской породы. Однако типичным для подзолистых и болотно-подзолистых почв является биогенное накопление фосфора в лесных подстилках. С увеличением уровня увлажнения почв запасы кислоторастворимого фосфора в 25-см толще почв убывают (табл. 2.1.6).

## Тяжелые металлы и железо в почвах сосновых и еловых лесов северной тайги

Содержание микроэлементов в почвах зависит от их количества в почвообразующих породах, а в последних, представленных рыхлыми отложениями, – от исходных магматических пород. В исследуемом районе значительное влияние на почвообразование оказывают коренные магматические горные породы – граниты и гранодиориты. Горные почвообразующие породы здесь представлены элюво-делювием кислых пород, а также верхними слоями четвертичных отложений, а именно: грубообломочным материалом различного гранулометрического состава. Сравнивая содержание микроэлементов в горных породах с кларком, можно отметить, что концентрация меди, цинка, марганца, кобальта, молибдена, никеля и бора в кислых горных породах Карелии ниже. Выше кларка накопление хрома и ванадия (табл. 2.1.7).

**Таблица 2.1.7.** Содержание микроэлементов в горных породах  
**Table 2.1.7.** Trace element contents in bedrock

Порода	Cu	Zn	Mn	Co	Mo	B	Cr	V	Ni	Fe
Кислые горные породы	20	50	458	3	1,5	5	30	54	14	25 000
Морена песчаная	7,4	8,2	362	3,5	0,9	6,0	60	98	16	17 000
Пески флювиогляциальные	7,7	12,9	353	3,3	0,8	8,3	50	56	16	8400
Кларк*	30	60	600	5	1,9	15	25	40	80	50 000

\* Сает и др., 1990.

Количество микроэлементов в песках и песчаной морене, являющихся почвообразующими породами, близко между собой и при этом по большинству показателей ниже кларка. Содержание микроэлементов в горных и почвообразующих породах приводится по материалам М. А. Тойкка (Тойкка и др., 1971) (табл. 2.1.7). Перераспределение микроэлементов в процессе выветривания и почвообразования происходит, в основном, на уровне концентраций, которыми характеризуются породы.

Исследование количественных показателей накопления и перераспределения по профилю микроэлементов проводили в наиболее распространенных на данной территории подзолах трех родов: иллювиально-железистых, иллювиально-гумусово-желези-

стых и иллювиально-железисто-гумусовых, а также в гидроморфных почвах – торфянисто-перегнойно-глеевых под еловыми лесами (табл. 2.1.8). Характер распределения по почвенному профилю микроэлементов в подзолах иллювиально-железистых, иллювиально-гумусово-железистых и иллювиально-железисто-гумусовых аналогичен. В лесных подстилках отмечено биогенное накопление меди, цинка и марганца. Автохтонное концентрирование в почвах присуще соединениям железа, никеля, хрома и кобальта. Аллохтонный характер накопления имеют, по нашему мнению, соединения кадмия и свинца. Элювиально-иллювиальное распределение по профилю подзолов присуще соединениям почти всех микроэлементов, кроме кадмия и свинца.

**Таблица 2.1.8.** Валовое содержание железа и микроэлементов в почвах экологических рядов сосновых и еловых лесов, мг/кг  
**Table 2.1.8.** Total trace element and iron content in soils in the ecological series of pine and spruce forests, ppm

Горизонт, глубина, см	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	Fe	Cd	Pb
Подзол иллювиально-железистый пылевато-связнопесчаный.									
Сосняк воронично-брусничный									
A0 0–5	11,5	57,3	10,0	3,0	15,8	630	6800	0,80	13,3
A2 5–10 (24)	7,8	11,6	4,5	1,4	21,4	447	11 200	0,88	12,2
Bf 10 (24)–20 (35)	4,9	48,6	14,4	4,4	36,7	1170	16 500	0,96	12,8
B2 10 (35)–33 (40)	6,1	29,0	13,4	9,6	34,2	508	15 100	0,73	12,7
B3 33 (40)–57 (62)	5,9	24,6	12,5	7,5	27,2	462	13 700	0,62	11,5
BC 7 (62)–80	6,7	22,0	12,9	7,9	30,2	479	11 100	0,62	11,5
C 80–глубже	6,7	19,1	9,7	5,1	31,6	492	10 200	0,63	8,7
Подзол иллювиально-гумусово-железистый пылевато-связнопесчаный.									
Сосняк воронично-черничный									
A0 0–6	12,0	53,2	11,0	3,0	18,0	850	4200	0,29	11,7
A2 6–12	5,5	23,2	4,9	1,8	23,9	174	6430	0,24	8,5
Bhf 12 (18)–24 (26)	6,7	30,0	7,1	5,0	34,9	316	15 700	0,62	6,0
Bf 24 (26)–34 (35)	7,6	24,3	8,2	4,4	32,6	360	13 000	0,58	3,3
B3 34 (35)–51	9,3	27,1	8,5	5,1	47,9	543	13 700	0,55	3,4
BC 51–72	5,9	28,9	8,9	4,3	54,1	841	15 800	0,43	4,3
C 72–глубже	6,6	21,9	8,9	4,3	49,7	482	14 000	0,55	4,5
Подзол иллювиально-железисто-гумусовый пылевато-связнопесчаный.									
Ельник черничный влажный									
A0 0–10	12,0	34,0	10,4	2,8	20,7	538	5160	0,76	21,0
A2 10–20 (30)	5,9	10,3	9,80	8,1	34,6	280	8180	0,86	12,0

Окончание табл. 2.1.8

Горизонт, глубина, см	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	Fe	Cd	Pb
Bfh 20 (30)–35 (46)	6,4	23,1	12,8	18,2	38,4	658	16 900	0,85	13,7
Bf 5 (46)–54 (60)	9,7	19,2	13,0	10,9	38,1	510	14 500	0,84	13,2
BC 4 (60)–96	10,0	20,2	14,1	12,0	39,4	427	13 000	0,52	10,8
C 96–глубже	9,2	19,6	15,8	8,9	42,5	221	10 800	0,44	3,9
Торфянисто-перегнойно-глеевая пылевато-песчаная.									
Ельник травяно-хвощово-сфагновый									
T0 0–4	13,0	35,6	10,0	2,8	17,4	4190	14 400	0,53	8,5
T0A1 4–9	21,2	46,1	12,8	13,5	48,3	3740	17 400	0,85	12,3
Bf 10 (24)–20 (35)	4,9	48,6	14,4	4,4	36,7	1170	16 500	0,96	12,8
B2 10 (35)–33 (40)	6,1	29,0	13,4	9,6	34,2	508	15 100	0,73	12,7
B3 33 (40)–57 (62)	5,9	24,6	12,5	7,5	27,2	462	13 700	0,62	11,5
BC 7 (62)–80	6,7	22,0	12,9	7,9	30,2	479	11 100	0,62	11,5
C 80–глубже	6,7	19,1	9,7	5,1	31,6	492	10 200	0,63	8,7
Региональные фоновые концентрации*									
Подстилка	11,3	63,2	13,6	3,0	13,8	1465	6817	0,50	22,7
Минеральные горизонты	18,5	37,2	27,5	11,6	47,3	282	17 505	–	15,5
ПДК**	100	300	50	50	100	1500	–	3	32,0
Кларк***	20	50	40	10	83	850	30 000	–	16,0

\* Федорец и др., 2008.

\*\* Рэуце, Кырстя, 1986.

\*\*\* Сает и др., 1990.

В торфянисто-перегнойно-глеевой почве торфяной очес не является горизонтом аккумуляции ни элементов-биофилов, ни аллохтонных элементов. Основное количество всех определенных нами микроэлементов концентрируется в перегнойном горизонте T0A1, кроме марганца, которого в моховом очесе больше, чем в нижележащих горизонтах.

В иллювиальных горизонтах подзолов отмечен второй максимум накопления большинства микроэлементов. Содержание кадмия в лесных подстилках и органогенных горизонтах гидроморфных почв колеблется и в отдельных случаях превышает фоновые показатели, однако каких-либо закономерностей его накопления в почвах не выявлено (табл. 2.1.8). В лесных подстилках и органогенных горизонтах гидроморфных почв выявлено накопление ниже фоновых показателей свинца, цинка, марганца и железа, а никеля, кобальта, хрома, меди – на уровне фоновых концентраций.



В минеральных горизонтах подзолов ниже фоновых являются показатели накопления свинца, меди, цинка, никеля, кобальта, хрома. Таким образом, количество большинства микроэлементов в исследованных почвах ниже или близко к фоновым концентрациям. Что касается марганца, то его содержание в минеральных горизонтах подзолов превышает средние значения для почв Карелии, а количество железа – близко к фоновым показателям. Следует отметить обогащенность профиля торфянисто-перегнойно-глеевой почвы железом и марганцем. Сравнивая величины концентрации микроэлементов в исследованных подзолах и торфянисто-перегнойно-глеевой почве, выявили, что ни один из определенных нами элементов не достиг предельно допустимых концентраций (ПДК), т. е. почвы не являются загрязненными. При этом следует отметить, что региональные фоновые концентрации меди, цинка, никеля, марганца и кобальта в минеральных горизонтах подзолов ниже кларка.

Выявлена четкая зависимость запасов микроэлементов в лесных подстилках от уровня увлажнения почв, а именно: с увеличением уровня гидроморфизма возрастают запасы микроэлементов (табл. 2.1.9).

**Таблица 2.1.9.** Валовые запасы микроэлементов в лесных подстилках, кг/га

**Table 2.1.9.** Total storage of trace elements in forest litter, kg/ha

Тип леса, почва	Cu	Zn	Ni	Co	Cr
Сосняк воронично-брусничный. Подзол иллювиально-железистый	0,328	1,623	0,285	0,074	0,452
Сосняк воронично-черничный. Подзол иллювиально-гумусово-железистый	0,365	1,638	0,335	0,091	0,549
Ельник черничный. Подзол иллювиально-железисто-гумусовый	0,602	1,706	0,522	0,140	1,039
Ельник травяно-хвощово-сфагновый. Торфянисто-перегнойно-глеевая	0,789	2,161	0,607	0,170	1,056

Количество подвижных соединений микроэлементов, доступных растениям, во всех исследованных почвах низкое (табл. 2.1.10). Содержание меди в подстилках подзолов колеблется от 0,023 до 0,037 мг/кг, а в минеральных горизонтах – от 0,001 до 0,018 мг/кг. Количество цинка в лесных подстилках значительно выше и составляет 1,62–3,64, а в минеральных горизонтах – 0,001–0,10 мг/кг.

**Таблица 2.1.10.** Подвижные формы микроэлементов в почвах хвойных лесов, мг/кг

**Table 2.1.10.** Labile forms of trace elements in soils of coniferous forests, ppm

Горизонт, глубина, см	Вытяжка $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ , pH 4,8						Вытяжка $\text{NH}_4\text{Cl}$ 1,0 N	
	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	Cd	Pb
Подзол иллювиально-железистый пылевато-связнопесчаный.								
Сосняк воронично-брусничный								
A0 0–5	0,028	3,640	0,055	0,033	0,018	15,039	0,021	0,048
A2 5–10 (24)	0,016	0,051	0,006	0,006	0,016	0,582	0,001	0,040
Bf 10 (24)–20 (35)	0,011	0,043	0,011	0,007	0,011	0,543	0,008	0,001
B2 20 (35)–33 (40)	0,018	0,101	0,019	0,014	0,020	0,854	0,001	0,021
B3 33 (40)–57 (62)	0,003	0,007	0,001	0,007	0,015	0,034	0,001	0,001
BC 57 (62)–80	0,017	0,009	0,007	0,008	0,015	0,019	0,003	0,001
C 80–глубже	0,006	0,009	0,010	0,005	0,015	0,022	0,001	0,001
Подзол иллювиально-гумусово-железистый пылевато-связнопесчаный.								
Сосняк воронично-черничный								
A0 0–6	0,031	2,772	0,052	0,052	0,014	13,358	0,027	0,037
A2 6–12	0,014	0,044	0,012	0,005	0,013	0,096	0,001	0,030
Bhf 12 (18)–24 (26)	0,007	0,023	0,009	0,003	0,018	0,044	0,001	0,001
Bf 24 (26)–34 (35)	0,006	0,019	0,003	0,006	0,014	0,097	0,001	0,001
B3 34 (35)–51	0,007	0,013	0,009	0,003	0,014	0,057	0,001	0,011
BC 51–72	0,001	0,013	0,007	0,005	0,018	0,037	0,001	0,001
C 72–глубже	0,001	0,013	0,008	0,001	0,016	0,015	0,001	0,001
Подзол иллювиально-железисто-гумусовый пылевато-связнопесчаный.								
Ельник черничный влажный								
A0 0–10	0,025	1,623	0,075	0,014	0,013	14,285	0,077	0,056
A2 10–20 (30)	0,012	0,022	0,015	0,004	0,005	0,023	0,001	0,010
Bfh 20 (30)–35 (46)	0,010	0,036	0,016	0,006	0,044	0,054	0,001	0,012
Bf 35 (46)–54 (60)	0,012	0,039	0,010	0,001	0,020	0,011	0,001	0,006
BC 54 (60)–96	0,011	0,005	0,020	0,001	0,012	0,017	0,001	0,001
C 96–глубже	0,002	0,001	0,015	0,001	0,005	0,025	0,001	0,001
Торфянисто-перегнойно-глеявая пылевато-песчаная.								
Ельник травяно-хвощово-сфагновый								
T0 0–4	0,015	1,548	0,077	0,015	0,033	7,685	0,021	0,001
T0A1 4–9	0,019	0,419	0,079	0,027	0,053	7,201	0,007	0,054
Bf 9–27	0,006	0,010	0,022	0,006	0,001	2,625	0,001	0,001
B2 27–44	0,027	0,009	0,007	0,002	0,005	2,111	0,001	0,001
BC1 44–54	0,006	0,047	0,026	0,063	0,018	2,781	0,003	0,001
BC2g 54–61	0,011	0,001	0,028	0,028	0,026	2,300	0,002	0,001
Cg 61–глубже	0,013	0,001	0,016	0,008	0,019	2,300	0,001	0,001
ПДК*	3,0	23,0	4,0	5,0	6,0	–	–	–

\* Сает и др., 1990.

Содержание никеля, кобальта, хрома и марганца в лесных подстилках подзолов находится в тех же количественных пределах, что и медь, составляя, соответственно: 0,055–0,075; 0,014–0,052; 0,013–0,018; 13,36–15,04 мг/кг. В минеральных горизонтах подзолов количество указанных микроэлементов составляет: 0,001–0,190; 0,001–0,014; 0,002–0,018; 0,015–0,582 мг/кг. Концентрация наиболее токсичных микроэлементов-загрязнителей – кадмия и свинца – имеет примерно те же количественные показатели, что и концентрация микроэлементов-биофилов. В лесных подстилках кадмия 0,077–0,027; свинца 0,037–0,056. В минеральных горизонтах кадмия 0,001–0,008, свинца 0,001–0,030 мг/кг.

В целом следует отметить, что подвижные соединения микроэлементов накапливаются преимущественно в лесных подстилках, в отдельных случаях первый максимум наблюдается в иллювиальных горизонтах.

В гидроморфных почвах в моховом очесе концентрируются лишь цинк, кадмий и марганец. Максимальное накопление всех остальных из определенных нами микроэлементов приурочено к нижележащим горизонтам: в торфянисто-перегнойно-глеевой почве – это T0A1 или B2. В лесных подстилках подзолов количество подвижных форм микроэлементов в составе валового содержания значительно превышает этот показатель для минеральных горизонтов.

Таким образом, проведенные исследования показали, что перераспределение микроэлементов в процессе выветривания и почвообразования происходит, в основном, на уровне концентраций, которыми характеризуются почвообразующие породы. Уровень накопления микроэлементов в почвах соответствует региональным фоновым концентрация или ниже их.

## 2.2. Фоновый экологический мониторинг лесных почв в среднетаежной подзоне Карелии (заповедник «Кивач»)

## 2.2. Background ecological monitoring of forest soils in the middle-taiga subzone of Karelia (Kivach nature reserve)

На пробных площадях, расположенных в буферной зоне и на территории заповедника «Кивач» в сосновых лесах, проводили изучение эдафических условий, исследовали морфологические, физические и химические свойства почв, а также был организован мониторинг с целью определения наличия и степени деградиационных процессов лесных экосистем под влиянием атмосферного загрязнения.

*В типе местности волнистой песчаной озерно-ледниковой равнины* в урочище песчаных равнин заложена серия пробных площадей, различающихся по уровню увлажнения и трофности (сосняк лишайниковый, брусничный, черничный и кустарничково-долгомошный). В зависимости от условий местопроизрастания производительность древостоев лежит в пределах от Ia,5 до Va,2 класса бонитета (табл. 2.2.1) Согласно ранее проведенным сотрудниками Института леса исследованиям, максималь-

**Таблица 2.2.1.** Таксационная характеристика древостоев  
**Table 2.2.1.** Mensurational description of forest stands

ПП	Состав по породам	Возраст, лет	Ср. высота, м	Ср. диаметр, см	Кол. стволов, шт./га	Полнота	Запас, м <sup>3</sup>	Бонитет	Тип леса
1	10С	160	23,7	31,7	352	0,75	296	III,4	С. лишайниковый
2	10С	170	26,0	34,6	324	0,88	404	II,5	С. брусничный
3	10С	170	28,0	33,2	458	0,92	460	II,0	С. черничный
4	10С	160	9,0	Нет данных	Нет данных	0,65	Нет данных	V,2	С. кустарничково-долгомошный

но возможная для данной территории производительность сосновых древостоев составляет Ia,5 класса бонитета при средней многолетней сумме температур  $+10^{\circ}$  и выше –  $1405^{\circ}$  и годовом количестве осадков 680 мм. Это говорит о том, что на территории заповедника существуют благоприятные условия для произрастания древесных насаждений, при которых древостои максимально используют почвенно-гидрологический и климатический потенциал. Изученные насаждения представлены в основном чистыми по составу или с небольшой примесью других пород древостоев простого строения, за исключением пробной площади в сосняке черничном, где присутствует второй ярус из ели. Возраст древостоев колеблется от 140 до 170 лет, полнота изменяется от 0,65 до 1,00 при сомкнутости крон от 0,4 до 0,7. При этом во всех случаях сомкнутость крон несколько ниже полноты древостоя. В напочвенном покрове доминируют растения, обычные для средней подзоны тайги: черника, брусника, линнея северная, плаун годичный, хвощ лесной, кислица, седмичник европейский, майник, золотая розга, ландыш, грушанка и др.

*Разрез 1* заложен в сосняке лишайниковом в лишайниковой парцелле. Почва: поверхностно-подзолистая песчаная на флювиогляциальных песках, имеет следующее морфологическое строение:

A0 0–3 см (10YR4/1). Лесная подстилка бурого цвета, грубогумусная, сложена остатками лишайников, мхов, рыхлая, свежая, слабо пронизана корнями растений напочвенного покрова. В нижней части – угли.

A2B 3–8 (11) (5YR6/3). Подзолистый горизонт, неоднородная окраска: на белесом фоне затеки гумуса из верхнего горизонта, встречаются бурые пятна, песчаный, свежий, корней мало, много углей.

Bf1 8 (11)–24 (10YR4/6). Иллювиально-железистый горизонт, бурый с пятнами темного цвета по ходам корней, тонкозернистый песок, хорошо сортированный, свежий, степень насыщенности корнями высокая, много углей, переход в следующий горизонт постепенный по цвету.

B2 24–44 (10YR4/4). Иллювиально-железистый горизонт, бурого цвета, окраска более светлая, чем у предыдущего горизонта, од-

нородная, мелкопесчаный, рыхлый, свежий, насыщенность корнями низкая, угли встречаются редко, переход в следующий горизонт ясный по изменению механического состава.

BC 44–100 (10YR4/2). Переходный горизонт к материнской породе. Неоднородно окрашен: серовато-бурый, встречаются мелкие зерна шунгита, песчаный среднезернистый, рыхлый, более увлажненный, чем предыдущие горизонты, корней нет, переход в следующий горизонт ясный по цвету и механическому составу.

C 100–120. Материнская порода, светло-серого цвета, рыхло-песчаная, свежая.

*Разрез 2* заложен в сосняке брусничном в бруснично-зелено-мошной парцелле. Почва – подзол иллювиально-железистый песчаный на флювиогляциальных отложениях, подстилаемых ленточными глинами, имеет следующее морфологическое строение:

A0' 0–2 см (10YR3/2). Лесная подстилка слаборазложившаяся, состоит из отмерших мхов, опада брусники и сосны, рыхлая.

A0'' 2–4 (5) см (10YR3/2). Лесная подстилка, полуразложившаяся, грубогумусная, рыхлая, в нижней части встречаются угли, корней растений мало.

A2 4 (5)–7 (8) см (10YR6/1). Белесый, песчаный, тонкозернистый, в верхней части встречаются угли, рыхлый, корней мало; переход в нижележащий горизонт ясный, языковатый.

Bf1 7 (8)–30 см (10YR5/4). Ржаво-охристый, в верхней части с буроватыми пятнами, песчаный, рыхлый, много корней; переход в горизонт в горизонт Bf2 постепенный по окраске.

B2 30–50 (60) см (10YR6/3). Серовато-желтый с ржавыми пятнами и потеками, песчаный с включением хряща, слегка уплотнен, корней мало.

B3 50 (60)–120 см (10YR6/3). Того же цвета, что и предыдущий горизонт, но меньше ржавых пятен, более рыхлый.

BC 120–170 см (2,5YR7/2). Грязно-серый песок с ржавыми пятнами и сизыми потеками.

C 170–200 см (2,5YR7/2). Того же цвета, что и предыдущий горизонт, на границе с ленточными глинами сизоватость усиливается.

Д глубже 200 см (5GY6/1). Сизые плотные ленточные глины с ржавыми пятнами.

*Разрез 3* заложен на мезопонижении в сосняке черничном в чернично-зеленомошной парцелле. Почва – подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный на двучленных отложениях, имеет следующее морфологическое строение:

A0 0–3 (7) (10YR3/2). Лесная подстилка средней степени разложения, слоистая, обильно пронизана корнями, сложена остатками хвои, кустарничков, веток, корней; свежая, на границе перехода – угли.

A2 3 (7)–10 (10YR6/2). Серого цвета, свежий, бесструктурный, песчаный, среднезернистый, встречаются корни сосны, переход в следующий горизонт по неровной линии, в верхней части горизонта – угли, потечный гумус.

Bhf 10–27 (10YR8/3). Коричневато-бурого цвета среднезернистый песок, свежий, бесструктурный, встречаются угли, корни сосны различного диаметра, переход в следующий горизонт неровный.

Bf 27–43 (10YR8/4). Буровато-желтый среднезернистый песок, встречаются пятна темно-охристого цвета, корней много, переход в следующий горизонт по изменению цвета и сложению.

ПВЗ 43–64 (10YR8/5). Коричневато-желтый легкий суглинок, более плотный, чем предыдущий горизонт, с включениями угля, влажный, корней немного, переход в следующий горизонт постепенный.

B4 64–90 (10YR6/4). Серовато-желтого цвета хорошо сортированный песок, среднезернистый, влажный, корней нет, переход постепенный.

BC 90–110 (10YR6/2). Светло-серый тонкозернистый песок, пятна более темного цвета, встречаются отдельные корни сосны, переход отчетливый по механическому составу.

C 110–160 (10YR5/2). Оливкового цвета с рыжими пятнами, песчаный, плотный, влажный.

*Разрез 4* заложен на периферийной части болота в сосняке кустарничково-долгомошном в чернично-багульниковой парцелле. Почва – торфянистый подзол иллювиально-гумусовый песчаный на двучленных отложениях, имеет следующее морфологическое строение:

A0' 0–6 (10YR3/3). Бурый слаборазложившийся торф, слоистый, обильно пронизана корнями, сложен остатками хвои, кустарничков, свежий.

A0'' 6–15 (20) (10YR3/1). Темно-бурый, почти черный, хорошо разложившийся торф, много корней кустарничков и древесных пород, на границе с подзолистым горизонтом встречаются единичные угли.

A2 15 (20)–20 (30) (10YR6/2). Серого цвета, в верхней части с буроватыми пятнами, песчаный с отдельными некрупными валунами и галькой, свежий, бесструктурный, среднезернистый, встречаются корни сосны, переход в следующий горизонт по неровной линии, в верхней части горизонта – угли, потечный гумус.

Bh1 20 (30)–25 (37) (10YR3/4). Коричневатый, среднезернистый песок, сырой, уплотненный, встречаются железистые конкреции, корней мало, переход в следующий горизонт неровный.

Bh2 25 (37)–40 (43) (10YR4/3). Коричневый, светлее предыдущего, среднезернистый песок, встречаются пятна темно-охристого цвета, переход в следующий горизонт по изменению цвета и сложенности.

Bg 40–43 (10YR6/2). Пестро окрашенный, сизовато-бурый, более плотный, чем предыдущий горизонт, влажный, переход в следующий горизонт постепенный.

BCg 90–110 (10YR6/1). Сизый с бурыми и ржавыми пятнами, тонкозернистый песок, пятна более темного цвета, насыщен водой.

Для подзолов характерна четкая дифференциация профиля на горизонты. Мощность генетических горизонтов сильно варьирует в зависимости от растительности, условий увлажнения, элемента рельефа и почвообразующей породы. Мощность подзолистого горизонта нарастает с увеличением уровня увлажнения почвы при одновременном увеличении мощности лесной подстилки. Подзолистый горизонт в зависимости от вида почвы может быть представлен тонкой прослойкой (1–2 см) с неоднородной окраской (горизонт A2B) или с большим включением органического вещества (горизонт A1A2) – это касается поверхностно-подзолистых почв. Может иметь ярко-белесую окраску и значительную мощность (подзолы). Иллювиальные горизонты в зависимости от содержания железа, алюминия и гумуса могут быть окрашены в тускло-охристые, охристые и бурые тона. При переходе от ксероморфных условий к более влажным интенсивность бурой окраски иллювиального горизонта нарастает.



## Валовой химический состав

Поверхностно-подзолистые почвы развиты на полимиктовых песках, о чем свидетельствует высокое содержание кремнекислоты по всему профилю (около 80 %) и накопление щелочных и щелочноземельных металлов (табл. 2.2.2). Накопление кремнезема в горизонте A1A2 незначительно, однако отмечается вынос из данного горизонта оксида алюминия. Накопление полуторных оксидов в генетических горизонтах почвы по сравнению с породой проявляется слабо.

Данные валового химического состава иллювиально-железистых подзолов показывают, что распределение кремнекислоты и полуторных оксидов дифференцировано по горизонтам. Подзолистый горизонт обогащен оксидом кремния и обеднен гидроксидами железа и алюминия. Иллювиальный горизонт обеднен кремнекислотой и обогащен полуторными оксидами. В подзолистом горизонте разрушены минералы, содержащие магний и марганец. Для магния характерна элювиально-иллювиальная дифференциация содержания по профилю, в то время как для кальция, калия и натрия такой закономерности не выявлено. Для всех элементов, кроме кремния, отмечается биогенная аккумуляция в лесной подстилке.

Определение валового химического состава подзола иллювиально-гумусово-железистого показало значительное содержание полуторных оксидов по всему профилю. Распределение кремнекислоты по профилю почвы носит ясно выраженный элювиально-иллювиальный характер. Активно происходит разрушение алюмосиликатов, из подзолистого горизонта выносятся оксиды железа и алюминия и осаждаются в иллювиальном горизонте. Отмечено биогенное накопление в подстилках и элювиально-иллювиальное распределение по профилю кальция и магния. Разрушение магнийсодержащих минералов происходит интенсивно, в результате чего отмечается более высокое содержание элемента в иллювиальном горизонте по сравнению с элювиальным.

Данные валового химического анализа торфянистых подзолов иллювиально-гумусовых свидетельствуют о четко выраженном элювиально-иллювиальном распределении большинства химических элементов в профиле почвы и биогенной аккумуляции их в органическом горизонте.

**Таблица 2.2.2.** Валовой химический состав подзолов, % к прокаленной почве

**Table 2.2.2.** Bulk chemical composition of Podzols, % of ignited soil

Горизонт	Глубина, см	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MnO	SO <sub>3</sub>
Поверхностно-подзолистая песчаная почва												
A0	0–2	77,22	2,93	13,19	1,29	4,14	0,70	1,89	1,83	0,46	0,49	0,84
A1A2	2–4	81,91	2,95	9,95	0,09	1,86	0,18	0,32	2,35	0,33	0,03	Сл.
B1	4–20	80,35	2,13	11,03	0,11	1,61	0,34	1,47	3,07	0,27	0,05	0,07
B2	20–60	80,00	2,29	10,33	0,07	1,55	0,70	1,52	3,21	0,24	0,04	0,01
B3	60–130	79,84	1,98	10,73	0,04	1,50	0,58	1,63	3,32	0,16	0,03	0,02
BC	130–220	81,00	1,74	10,19	0,04	1,48	0,44	1,61	3,12	0,17	0,02	0,09
C	220–300	81,58	1,64	9,81	0,07	1,63	0,48	1,51	2,82	0,17	0,03	Сл.
Подзол иллювиально-железистый песчаный												
A0'	0–2	45,78	6,46	14,00	4,12	14,2	2,61	6,51	1,29	–	1,70	2,82
A0''	2–4	75,67	2,52	10,99	1,42	3,27	0,86	2,15	1,64	0,30	0,41	0,74
A2	4–7	85,23	0,80	9,06	0,001	1,58	0,15	1,55	2,06	0,11	Сл.	0,23
Bf1	7–30	82,23	1,85	9,94	0,08	1,20	0,34	0,45	2,03	0,19	0,03	0,23
Bf2	30–50	81,82	1,29	10,46	0,03	1,26	0,39	1,66	2,57	0,13	0,03	0,16
B3	50–120	82,56	1,08	10,14	0,03	1,22	0,35	1,66	2,41	0,11	0,07	0,28
BC	120–170	83,40	1,18	10,22	0,03	1,26	0,55	1,75	2,44	0,11	0,06	0,19
C	170–200	68,98	4,20	16,50	0,03	1,82	0,53	2,61	2,41	0,55	0,08	0,17
Подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный												
A0	0–3 (7)	74,40	2,90	10,50	0,47	3,61	1,64	2,08	1,49	0,36	0,38	0,32
A2	3 (7)–10	79,90	2,00	10,70	0,05	2,10	1,23	1,52	1,65	0,31	0,15	0,09
Bhf	10–27	74,40	3,20	13,40	0,11	3,05	1,66	1,41	1,76	0,33	0,24	0,13
Bf	27–43	75,80	3,00	11,70	0,09	2,80	1,36	1,44	1,81	0,24	0,34	0,07
ПВ3	43–64	75,16	3,00	11,56	0,08	1,96	1,11	1,39	1,86	0,28	0,15	0,04
BC	64–110	76,77	2,72	11,71	0,06	1,87	1,00	1,49	1,85	0,29	0,14	0,04
C	110–160	75,20	2,70	12,70	0,16	3,04	1,65	1,50	1,89	0,34	0,24	0,09
Торфянистый подзол иллювиально-гумусовый												
A0'	0–6	70,83	2,30	11,22	2,03	5,27	1,51	2,32	1,67	0,26	0,12	1,19
A0''	6–15	52,49	1,69	9,70	0,57	1,24	0,41	1,41	1,83	0,34	0,05	0,24
A2	15–20	86,81	0,41	8,35	0,03	0,64	0,10	1,28	1,83	0,12	0,02	0,06
Bh1	20–25	78,55	1,35	14,05	0,15	1,18	0,58	1,58	2,22	0,26	0,02	0,14
Bh2	25–40	80,35	1,24	12,61	0,09	1,04	0,46	1,64	2,25	0,17	0,02	0,02
Bg	40–60	81,59	1,10	10,91	0,03	1,04	0,57	1,59	2,36	0,19	0,03	0,06
BCg	60–70	82,46	0,98	10,42	0,03	1,07	0,44	1,55	2,42	0,06	0,02	0,00

### Гранулометрический состав

Поверхностно-подзолистые почвы развиты на песках и хорошо сортированы. Содержание крупнозема в слое 0–100 см не превышает 6 %, в слое 120–200 см колеблется около 15 %, а глубже 2 м пре-

обладают крупнопесчаные частицы, которые составляют более 90 % от всего состава мелкозема. Содержание ила не превышает 2,5 %. Отмечается постепенное снижение содержания пылеватых и илистых частиц с глубиной. Наибольшее содержание илистой фракции отмечено в верхней части почвенного профиля. В связи с незначительным содержанием физической глины (6,5–1,1 %) пески имеют низкую гигроскопичность и водоудерживающую способность. Подзолы иллювиально-железистые формируются на разнозернистых слоистых песках. Гранулометрический состав представлен фракциями крупного и среднего песка. Содержание физической глины не превышает 3 %. Подзолистый горизонт несколько обогащен пылеватыми частицами за счет разрушения скелетной части почвы. При низком содержании ила отмечено его накопление в иллювиальном горизонте. Содержание мелкой пыли выше в подзолистом горизонте по сравнению с горизонтами ВС и С. Водно-физические константы свидетельствуют о хорошей водопроницаемости, малой водоудерживающей способности и высокой степени аэрации почв.

Профиль подзола иллювиально-гумусово-железистого под сосняком черничным носит анизотропный характер, а именно: отмечено наличие прослоек более тяжелого гранулометрического состава, залегающих на глубине 40 см мощностью 10–20 см (табл. 2.2.3). Они характеризуются повышенным содержанием илистых фракций, что не могло не сказаться на общих физико-химических свойствах этой почвы. Наличие прослоек объясняется формированием почвы на двучленных отложениях: флювиогляциальные пески на глубине около 2 м подстилаются ленточными глинами. Содержание физической глины в нижней части профиля на глубине около 100 см составляет 9,3 %, а в прослойке на глубине 43–64 см – 21,7 %. Почва в целом хорошо дренирована, в то же время растения не испытывают недостатка влаги в наиболее засушливые периоды года в связи с наличием прослоек тяжелого гранулометрического состава.

Торфянистые иллювиально-гумусовые подзолы сформировались на хорошо сортированных крупнозернистых песках. Верхняя часть профиля несколько обогащена пылеватыми и илистыми частицами. Вместе с тем существует четкая дифференциация профиля по содержанию ила и физической глины.

**Таблица 2.2.3.** Гранулометрический состав почв в сосновых лесах заповедника «Кивач», содержание фракций, % к абсолютно-сухой почве

**Table 2.2.3.** Particle size composition of soils in pine forests of the Kivach reserve, % of oven dry soil

Гори- зонт	Глуби- на, см	Размер частиц, мм						
		1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01
Поверхностно-подзолистая песчаная почва								
A1A2	2–4	81,4	3,3	8,8	3,7	0,3	2,5	6,5
B1	4–20	93,6	2,2	2,2	0,9	1,1	0,9	2,9
B2	20–60	94,3	1,8	1,2	0,9	0,6	0,9	2,3
B3	60–130	91,5	5,5	0,4	1,6	0,8	0,2	2,6
BC	130–220	94,2	4,2	0,8	0,4	0,2	0,2	0,8
C	220–300	42,5	50,6	5,4	0,4	0,5	0,6	1,5
Подзол иллювиально-железистый песчаный								
A2	4–7	23,2	66,0	2,1	3,5	0,7	3,9	8,1
Bf1	7–30	18,6	69,8	3,6	2,1	0,7	3,6	6,4
Bf2	30–50	24,2	66,6	3,7	1,6	0	3,2	4,8
B3	50–120	27,1	67,0	1,6	0,9	0,3	3,4	3,6
BC	120–170	16,8	78,7	1,2	0,4	0,2	2,4	3,0
C	170–200	44,1	52,1	0,2	1,1	0,7	1,5	3,4
Подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный								
A2	3(7)–10	59,7	21,5	12,8	1,4	1,5	2,6	5,5
Bhf	10–27	69,2	18,4	4,4	0,6	2,7	2,7	6,0
Bf	27–43	25,2	63,0	6,0	1,4	1,1	2,4	4,9
IIВ3	43–64	5,3	47,4	24,7	8,0	9,9	3,8	21,7
BC	64–110	0,8	54,9	34,03	1,4	1,8	6,1	9,3
C	110–160	1,0	59,6	32,9	2,1	1,6	2,2	5,9
Торфянистый подзол иллювиально-гумусовый								
A2	15–20	77,7	9,9	9,8	0,8	1,3	1,3	3,4
Bh1	20–25	71,2	13,8	7,8	2,0	2,9	2,3	7,2
Bh2	25–40	80,8	10,3	3,4	1,5	2,0	2,0	5,5
Bg	40–60	92,0	4,2	1,8	0,0	1,2	0,8	2,0
BCg	60–70	94,1	3,0	1,3	0,5	0,5	0,6	1,6

### Физико-химические свойства

Изучение кислотно-основных свойств поверхностно-подзолистых почв показало их высокую кислотность (табл. 2.2.4). Наиболее кислыми являются лесная подстилка и горизонт A1A2, где pH солевой вытяжки составляет 2,9–3,3, с глубиной кислотность снижается. Органическое вещество бедно азотом, отношение C : N составляет в лесной подстилке около 60–70, в то время как в мине-

ральных горизонтах оно значительно уже и составляет 19–20. Минеральные горизонты бедны гумусом ( $C = 0,23\text{--}0,98\%$ ). Степень насыщенности основаниями увеличивается с глубиной до 58 %. Отмечено биогенное накопление подвижного фосфора в верхних генетических горизонтах, а в лесной подстилке – подвижных соединений калия.

**Таблица 2.2.4.** Физико-химические показатели песчаных подзолов  
**Table 2.2.4.** Physicochemical properties of sandy podzols

Горизонт	Мощность, см	C	N	Степень насыщенности	pH сол.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> мг/100 г	K <sub>2</sub> O
				%			
Поверхностно-подзолистая почва							
A0	0–2	37,0	0,540	15,7	2,9	16,1	53,7
A1A2	2–4	1,10	0,140	13,8	3,3	17,4	1,0
B1	4–20	0,30	0,080	0,01	4,7	16,5	0,6
B2	20–60	0,10	0,056	0,01	4,7	6,6	0,4
B3	60–130	0,14	0,560	43,8	4,8	8,5	0,6
BC	130–220	0,01	0,10	65,6	4,5	9,9	0,8
C	220–300	0,01	0,01	58,1	4,4	9,0	0,8
Подзол иллювиально-железистый							
A0	0–4	43,1	1,08	14,3	2,9	58,4	183,3
A2	4–7	0,81	0,08	10,9	3,1	1,2	0,70
Bf1	7–30	0,50	0,11	0,01	4,4	20,8	1,20
Bf2	30–50	0,68	0,05	0,01	4,7	14,0	0,80
B3	50–120	0,31	0,08	29,4	4,7	8,5	0,60
BC	120–170	0,31	0,05	64,5	4,8	14,4	0,60
C	170–200	0,10	0,04	60,0	4,8	12,0	0,55
Подзол иллювиально-гумусово-железистый							
A0	0–3 (7)	47,4	1,29	33,7	3,3	40,0	100,0
A2	3 (7)–10	0,80	0,084	14,9	3,3	1,0	1,7
Bhf	10–27	1,80	0,095	1,57	3,9	34,0	1,5
Bf	27–43	0,50	0,075	10,7	4,8	12,2	0,8
IIIB3	43–64	0,40	0,058	0,6	4,9	6,6	1,5
BC	64–110	0,40	0,032	5,3	4,7	16,8	2,1
C	110–160	0,30	0,010	76,3	4,4	41,0	2,4
Торфянистый подзол иллювиально-гумусовый							
A0	0–15	45,6	1,00	28,4	2,6	10,6	108,1
A2	15–20	0,36	0,042	64,2	3,4	0,2	0,4
Bh1	20–25	3,94	0,129	17,9	3,8	1,5	1,2
Bh2	25–40	0,91	0,099	29,5	4,3	0,9	0,4
Bg	40–60	0,30	0,056	87,9	4,5	1,1	0,4
BCg	60–70	0,26	0,030	95,0	4,6	1,0	0,2

Подзолы иллювиально-железистые песчаные по своим физико-химическим показателям мало отличаются от поверхностно-подзолистых почв. Почвы сильнокислые, особенно высокую кислотность имеют лесная подстилка и подзолистый горизонт. В иллювиальном горизонте кислотность резко снижается. Отличительной чертой подзолов является характер распределения по профилю гумуса. Если в поверхностно-подзолистых почвах накопление гумуса отмечается в верхней части профиля, где формируется горизонт A1A2, а затем происходит постепенное снижение его количества вниз по профилю, то в подзолах сразу под лесной подстилкой формируется подзолистый горизонт A2. Органическому веществу подзолов свойственно низкое содержание азота и широкое отношение C : N. Степень насыщенности основаниями максимальная в лесных подстилках, с глубиной она снижается. Так же, как и в поверхностно-подзолистых почвах, происходит биогенное накопление в лесных подстилках азота и подвижных соединений фосфора и калия.

Подзолы иллювиально-гумусово-железистые характеризуются высокой кислотностью, особенно это типично для лесных подстилок и подзолистых горизонтов, вниз по профилю кислотность снижается. Максимальное накопление органического вещества выявлено в лесных подстилках, в минеральных горизонтах его накопление носит четко выраженный элювиально-иллювиальный характер, то же касается распределения по профилю валового азота и подвижного фосфора. Подвижные соединения калия накапливаются в лесных подстилках, вниз по профилю их содержание постепенно убывает.

Торфянистым подзолам иллювиально-гумусовым свойственно значительное содержание органического вещества по всему профилю. Большая часть профиля характеризуется слабой насыщенностью основаниями, которая возрастает в оглеенных горизонтах. В минеральных горизонтах наблюдается крайне низкое содержание соединений фосфора и калия, основные запасы которых, так же как и азота, сосредоточены в органогенных горизонтах.

#### Тяжелые металлы в почвах

В подзолах заповедника «Кивач» определено валовое содержание широкого спектра тяжелых металлов (меди, цинка, кад-

мия, никеля, кобальта, свинца, марганца, хрома) и железа. Установлено, что показатели накопления металлов в поверхностно-подзолистых почвах значительно ниже, чем средние данные по Кондопожскому административному району и Карелии в целом (Федорец и др., 1999). Лишь количество хрома и железа в лесных подстилках превышает региональный фон. Миграция и распределение каждого металла по профилю поверхностно-подзолистых почв имеет свою специфику. Накопление меди и цинка наибольшее в лесных подстилках, а в минеральной части профиля имеет слабо выраженный элювиально-иллювиальный характер. Содержание никеля, кобальта, железа и марганца увеличивается с глубиной в связи с зависимостью их накопления в почве от химического состава почвообразующей породы. Относительно распределения по профилю хрома и кадмия каких-либо закономерностей не выявлено. Четко прослеживается накопление в лесных подстилках свинца – до 1ПДК (табл. 2.2.5).

Песчаные почвы, сформировавшиеся на флювиогляциальных песках, самые бедные по содержанию микроэлементов. По характеру распределения в почвенных профилях их можно разделить на следующие группы: а) элементы, накопление которых в профиле почв приурочено в основном к горизонтам с повышенным содержанием органического вещества (свинец, медь, цинк, марганец), при этом они делятся на две подгруппы: первая – биофилы (медь, цинк и марганец), накопление которых в органических горизонтах, в нашем случае в лесных подстилках, носит биогенный характер, и вторая – когда растение может в процессе своей жизнедеятельности обходиться без данного элемента, но, тем не менее, накопление его происходит в лесной подстилке, играющей роль биогеохимического барьера, это, например, свинец; б) это элементы, накопление которых в почвенном профиле зависит от содержания в почвообразующей породе (железо, хром, никель, кобальт, кадмий); в) элементы, распределение которых в профиле имеет несколько максимумов – места концентрации органического материала и горизонты, прилегающие к материнской породе (медь). Для подзолов иллювиально-гумусово-железистых легкого гранулометрического состава в процессе почвообразования наблюдается тенденция

элювиально-иллювиального распределения по профилю большинства микроэлементов. По валовому содержанию в лесных подстилках соединения микроэлементов можно расположить в следующий ряд: железо > марганец > цинк > свинец > медь > хром > никель > кобальт > кадмий.

**Таблица 2.2.5.** Валовое содержание тяжелых металлов и железа в песчаных подзолах среднетаежной подзоны Карелии, мг/кг  
**Table 2.2.5.** Total trace element and iron content in sandy podzols in the mid-taiga subzone of Karelia, ppm

Горизонт	Глубина, см	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	Co	Mn	Fe
Поверхностно-подзолистая песчаная почва										
A0	0–2	0,44	32,0	13,0	19,4	64,8	5,1	1,4	140	4247
A1A2	2–4	0,23	5,1	16,3	7,4	21,4	2,9	3,0	79,0	7975
B1	4–20	0,23	5,2	19,8	16,6	49,0	7,4	4,4	180	19 042
B2	20–60	0,33	4,7	19,4	15,9	35,1	10,7	5,8	175	24 345
B3	60–130	0,37	4,9	24,6	17,9	22,9	7,8	5,7	186	15 786
BC	130–220	0,40	4,3	19,7	16,7	30,0	10,8	5,2	161	20 678
C	220–300	0,31	6,0	16,0	18,8	32,8	11,5	5,6	156	25 669
Подзол иллювиально-железистый песчаный										
A0	0–4	0,46	25,7	8,9	26,1	68,5	6,0	1,6	162	2186
A2	4–7	0,30	6,4	11,9	6,2	6,0	1,7	1,4	37,0	4081
Bf1	7–30	0,47	6,0	11,9	6,9	23,0	3,9	2,3	53,4	9058
Bf2	30–50	0,55	4,8	14,0	7,4	34,0	5,5	3,7	73,7	9724
B3	50–120	0,58	4,8	10,2	9,7	24,9	5,3	3,4	86,7	9226
BC	120–170	0,60	5,2	12,0	18,3	19,2	6,2	4,5	101	9430
C	170–200	0,51	5,2	11,0	20,1	21,0	7,8	4,9	99,0	9924
Подзол иллювиально-гумусово-железистый песчаный										
A0	0–3 (7)	0,26	20,7	9,0	16,7	64,7	7,0	1,4	175	2088
A2	3 (7)–10	0,46	5,9	18,0	9,1	19,2	3,6	2,0	72,4	7936
Bhf	10–27	0,26	8,1	26,2	7,9	31,1	4,8	3,2	98,9	21 150
Bf	27–43	0,31	6,4	21,8	8,0	38,9	7,7	4,3	141	20 144
ПВ3	43–64	0,48	6,7	23,8	11,1	26,4	9,3	5,2	120	24 510
BC	64–110	0,45	5,1	25,7	15,9	30,3	9,1	5,5	220	23 451
C	110–160	0,41	5,0	24,8	16,0	31,2	10,0	5,6	221	25 614
Торфянистый подзол иллювиально-гумусовый										
A0	0–15	0,44	16,6	6,0	12,5	21,5	3,6	0,6	51,9	1243
A2	15–20	0,15	6,9	16,1	8,7	9,8	2,3	1,2	37,1	2052
Bh1	20–25	0,33	9,0	20,4	10,1	20,0	4,6	1,7	38,4	5835
Bh2	25–40	0,40	8,5	20,1	17,3	19,3	6,4	2,3	61,4	8954
Bg	40–60	0,46	4,6	11,5	10,8	23,5	4,5	3,8	67,3	7838
BCg	60–70	0,48	4,9	12,1	11,3	24,8	5,1	4,0	68,2	8023



Исследование накопления и распределения по профилю торфянистых подзолов иллювиально-гумусовых тяжелых металлов свидетельствует об их низком общем содержании. Количество всех определенных нами тяжелых металлов и железа в лесных подстилках ниже средних значений не только по Кондопожскому району, но и по Карелии в целом. Выявлено особенно низкое содержание марганца, что характерно для гидроморфных почв, а также для торфяных горизонтов полугидроморфных почв. Отмечено элювиально-иллювиальное распределение по профилю торфянистых подзолов меди, цинка, кадмия и никеля. Количество хрома, марганца и кобальта выше в материнской породе, чем в лесных подстилках. Накопление свинца в лесных подстилках носит аэротехногенный характер.

Полученные данные о накоплении тяжелых металлов в подзолах разной родовой принадлежности имеют существенное значение, так как дадут возможность использовать эти показатели в качестве фоновых для характеристики песчаных подзолов в сосновых лесах на других территориях среднетаежной подзоны Карелии. Установление количества в почвах большинства тяжелых металлов, а также их пространственной и временной динамики позволило в настоящее время организовать и проводить фоновый мониторинг аэротехногенного загрязнения почв тяжелыми металлами.

### **Глава 3. ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ ЛАНДШАФТОВ СРЕДНЕТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ КАРЕЛИИ**

#### **Chapter 3. HEAVY METALS IN SOILS OF KARELIAN MID-TAIGA LANDSCAPES**

Необходимость исследований, связанных с изучением особенностей содержания и миграции тяжелых металлов на уровне географических ландшафтов, обусловлена тем, что уровень концентрации химических элементов сильно колеблется в зависимости от ландшафтно-экологических условий (Добровольский, 1999). Сведения о содержании микроэлементов-металлов в почвах с учетом региональных природных особенностей важны для оценки потребности в них растений, а также для решения задач охраны почв от загрязнения (Алексеев, 1987; Безносиков и др., 2005; Глазовская, 1999; Янин, 1999). Характеристики территориальных и внутрипрофильных закономерностей распределения микроэлементов, тенденции к накоплению или рассеиванию в естественных условиях являются необходимыми для проведения мониторинга, оценки фоновой геохимической структуры и устойчивости ландшафтов к загрязнению (Басыров и др., 2000; Ross, 1999). Эти данные служат также основой прогнозирования загрязнения почв тяжелыми металлами.

Объектами исследований служили почвы и почвообразующие породы трех типов ландшафтов среднетаежной подзоны Карелии, отличающиеся по геоморфологическим, литологическим особенностям, растительному покрову, почвообразующим породам и почвам (Волков и др., 1990) .

*Тип ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин среднезаболоченный с преобладанием еловых местообитаний* широко распространен на Восточно-Онежской равнине, в восточной части Заонежского полуострова, на Шуйской низменности и на северо-востоке Олонецкой равнины. Почвообразующие породы представлены озерно-ледниковыми ленточными глинами и су-

глинками, местами на поверхность выходит морена легкосуглинистого и суглинистого механического состава. Почвенный покров ландшафта представлен сочетаниями следующих почв: под березняками разнотравными и таволжными формируются элювиально-грунтово-глеевые суглинистые почвы. Перегнойно-грунтово-глеевые глинистые почвы развиваются под осинниками кисличными и черничными. На легкосуглинистой морене под сосняком черничным формируются подзолы иллювиально-железистые песчаные, на суглинках под ельниками кисличными – буроземы оглеенные вторично-задернованные суглинистые.

*Тип ландшафта денудационно-тектонического грядового (сельгового) среднезаболоченного с преобладанием сосновых местообитаний* приурочен к северному побережью Онежского озера. Этот ландшафт отличается широким разнообразием часто выходящих на поверхность коренных пород в основном кислого химического состава. Встречаются и габбро-диабазы – породы основного химического состава. В понижениях коренные породы покрыты плащом морены. На водораздельных участках ландшафта под сосняками и ельниками черничными развиваются примитивные, подзолистые неполноразвитые песчаные почвы, часто встречаются подбуры неполноразвитые супесчаные. В пониженных частях рельефа под ельниками кисличными распространены пятнистоподзолистые супесчаные почвы, а под сосняками и ельниками черничными – подзолы иллювиально-железистые песчаные. Торфяно-глеевые почвы развиваются под сосняками осоково-сфагновыми и хвощово-сфагновыми.

*Ландшафт ледниковый холмисто-грядовый среднезаболоченный с преобладанием еловых местообитаний* строгой географической приуроченности в пределах подзоны средней тайги Карелии не имеет. Почвообразующие породы здесь представлены верхними слоями четвертичных отложений – сильнокаменистой мореной супесчаного и легкосуглинистого гранулометрического состава. На автоморфных участках под сосняками и ельниками черничными развиты подзолы иллювиально-железистые песчаные. В более влажных местообитаниях встречаются подзолы иллювиально-гумусово-железистые песчаные,

а в полугидроморфных – торфянистые подзолы иллювиально-железисто-гумусовые супесчаные. Также широко распространены торфяно-глеевые переходные почвы.

В процессе исследований в каждом изучаемом типе ландшафта были заложены комплексные профили (рис. 3). Для идентификации почв была использована почвенная региональная классификация (Морозова, 1991), созданная на основе общепринятой почвенной классификации 1977 г. Полнопрофильные почвенные разрезы и прикопки закладывались при смене характера рельефа в каждом типе леса. Почвенные образцы отбирались по генетическим горизонтам почв.

В образцах определялось общее содержание и содержание в подвижной форме (в аммонийно-ацетатном буферном растворе с pH 4,8) микроэлементов: Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Mn, Cd, Pb и Fe методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии.

Математическая обработка результатов проводилась при помощи Statistica 6.

Также были рассчитаны коэффициенты концентрации (Саеи и др., 1990):

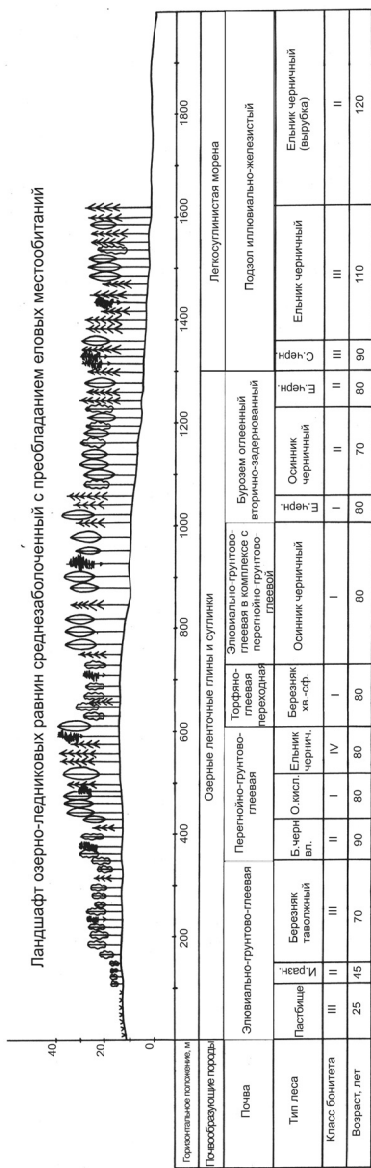
$K_{k1} = C_i/C_{i1}$  – отношение среднего содержания i-го элемента ( $C_i$ ) в органогенных горизонтах почв (лесной подстилке или оторфованных горизонтах) к фоновому содержанию i-го элемента в органогенных ( $C_{i1}$ ) горизонтах лесных почв Карелии.

$K_{k2} = C_i/C_{i2}$  – отношение среднего содержания i-го элемента ( $C_i$ ) в минеральных подподстилочных горизонтах почв к фоновому содержанию i-го элемента в минеральных подподстилочных горизонтах ( $C_{i2}$ ) лесных почв Карелии. Для расчетов были использованы данные фонового содержания тяжелых металлов в почвах Карелии (табл. 3).

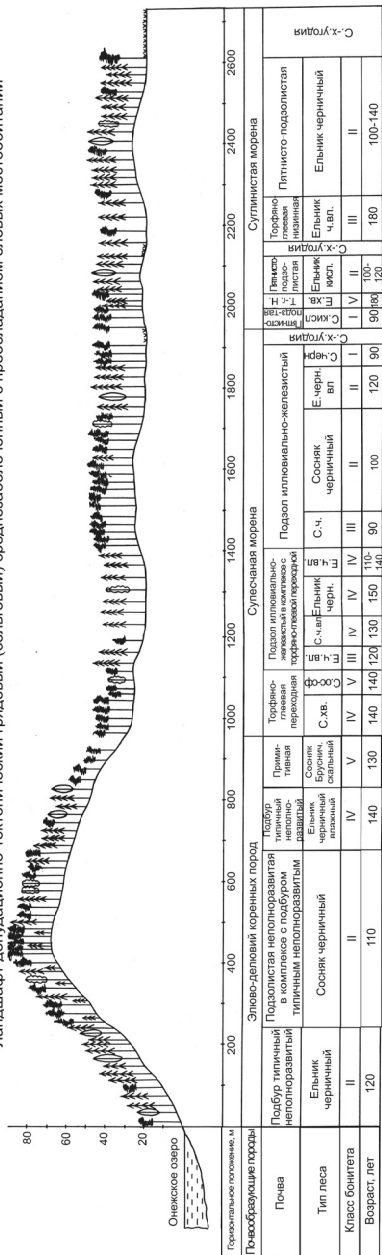
**Таблица 3.** Фоновое содержание тяжелых металлов и серы в органогенных и минеральных подподстилочных горизонтах почв Карелии (Федорец и др., 2008)

**Table 3.** Background concentrations of heavy metals and sulphur in organic and mineral horizons of Karelian soils

Горизонт	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Fe	Mn
Органогенный	0,52	23,3	37,9	67,6	7,2	1,8	10,0	1871,7	330
Минеральный подподстилочный	–	15,5	18,5	37,2	27,5	11,6	47,3	17505	282



Ландшафт денудационно-тектонический грядовый (сельвовый) среднезоболоченный с преобладанием еловых местообитаний





Для определения характера дифференциации и взаимосвязи элементов между горизонтами почв применяется коэффициент радиальной миграции, который представляет собой отношение содержания микроэлемента в горизонте почвы  $C_i$  к содержанию его в почвообразующей породе  $C_{non}$  (Сагит и др., 1990):

$$K_i = \frac{C_i}{C_{non}}.$$

### **3.1. Содержание тяжелых металлов в почвах ландшафтов среднетаежной подзоны Карелии**

#### **3.1. Heavy metal concentrations in soils of Karelian mid-taiga landscapes**

Микроэлементный состав почв является важным показателем химического состояния, свойств и генезиса почв, оказывает большое влияние на их плодородие. Почвы во многом наследуют микроэлементный состав почвообразующих пород, но в процессе почвообразования происходит его изменение, так как формирование микроэлементного состава почв подчиняется определенным закономерностям, которые обусловлены действием разнообразных факторов и является результатом многообразных и сложных процессов (Протасова, Щербаков, 2004).

Почвы изученных ландшафтов существенно различаются по генезису, химическим, физико-химическим свойствам и по микроэлементному составу. Анализ полученных данных показал, что по содержанию микроэлементов почвы изучаемых типов ландшафтов в большинстве случаев достоверно различаются ( $p < 0,05$ ).

*Ландшафт озерных и озерно-ледниковых равнин среднетаежной с преобладанием еловых местообитаний*

Главное влияние на микроэлементный состав почв данного типа ландшафта оказывает тяжелый гранулометрический состав почвообразующих пород, поэтому изучаемые почвы отличаются относительно высокими показателями содержания микроэлементов по сравнению с почвами ландшафтов денудационно-тектонического грядового и ледникового холмисто-грядового.

Почвы ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин сформированы на почвообразующих породах преимущественно тяжелого гранулометрического состава – на ленточных глинах и супесчано-суглинистой морене (Ахметова, 2008). Наибольшая концентрация большинства микроэлементов выявлена для слоистых глин, а значительно меньшая – для морены (табл. 3.1.1). Приуроченность к породам более тяжелого гранулометрического состава проявляется для следующих элементов – свинца, меди, цинка, никеля, кобальта, марганца, железа, тогда как для кобальта и хрома данная закономерность не выявлена.

**Таблица 3.1.1.** Общее содержание микроэлементов в почвообразующих породах ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин  
**Table 3.1.1.** Trace element content in parent rocks of lacustrine and glaciolacustrine valley landscapes

Порода	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Fe	Mn
Ленточные глины и суглинки, n = 4	0,23	4,7	33,8	47,6	28,7	12,6	44,6	15600	582
Легкосуглинистая морена, n = 5	0,27	1,1	17,8	16,7	13,3	4,4	65,4	11400	197

Концентрация микроэлементов в почвах сильно зависит от их генезиса и поэтому изменяется в очень широких диапазонах, коэффициенты вариации в основном высокие (табл. 3.1.2).

Содержание большинства микроэлементов в лесных подстилках почв данного ландшафта находится на уровне их фоновых концентраций, для кадмия, кобальта и хрома характерно почти двухкратное превышение фона ( $K_{к1} = 1,8–1,9$ ), а для меди – трехкратное ( $K_{к1} = 2,82$ ). Только для свинца и цинка выявлены низкие коэффициенты концентрации ( $K_{к1} = 0,4–0,5$ ). В минеральных горизонтах установлена иная закономерность, содержание большинства изучаемых микроэлементов в почвах ландшафта находится ниже их фоновых концентраций. Только содержание меди в изучаемых почвах приближается к фоновой величине ( $K_{к2} = 1,03$ ).

Наиболее низкие значения коэффициентов концентрации изучаемых элементов в лесных подстилках получены для подзолов иллювиально-железистых, более высокие – в элювиально-поверх-



ностно-глеевой и перегнойно-глеевой почвах и буроземе оглеенном (рис. 3.1.1). Значительные различия коэффициентов концентрации изучаемых элементов в лесных подстилах почв ландшафта выявлены для меди – от  $K_{к1} = 0,7$  для подзола иллювиально-железистого до  $K_{к1} = 6,2$  для перегнойно-грунтово-глеевой почвы. Также выделяются высокие уровни содержания хрома в лесной подстилке подзола иллювиально-железистого –  $K_{к1} = 3,2$ .

**Таблица 3.1.2.** Содержание микроэлементов в почвах ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин,  $n = 20$

**Table 3.1.2.** Trace element content in soils of lacustrine and glaciolacustrine valley landscapes,  $n = 20$

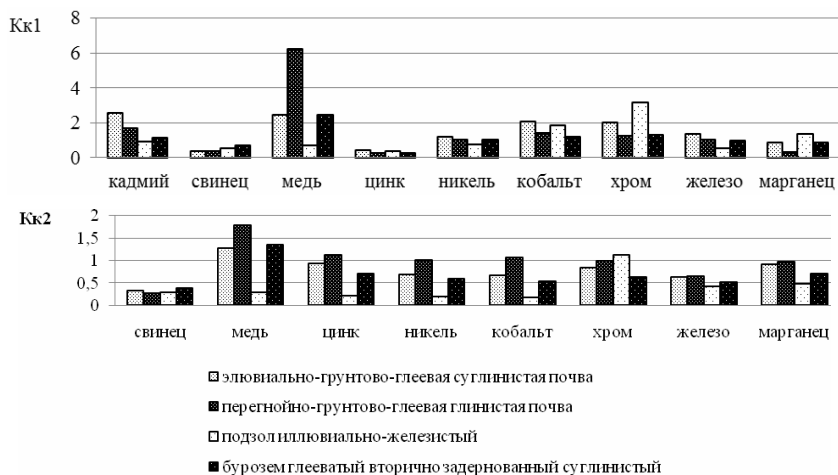
Эле- мент	Среднее	Пределы	V, %	Ко/Км	Среднее	Пределы	V, %	% от общего содержания
	мг/кг				мг/кг			
	Общее содержание				Содержание в подвижной форме			
Cd	0,77*	0,11–1,55	56	1,54	0,30	0,01–0,50	93	40
	—**	—	—	—	0,07	0,01–0,12	43	—
Pb	11,6	2,7–22,6	42	0,51	1,13	0,05–3,49	96	10
	5,1	0,7–8,1	40	0,33	0,17	0,05–0,39	76	2,9
Cu	31,9	5,9–98,6	81	2,82	0,64	0,01–2,7	117	2
	19,0	2,0–48,0	57	1,03	0,29	0,01–0,60	120	0,9
Zn	26,2	12,7–47,0	38	0,41	7,10	1,55–17,8	66	27
	25,6	4,9–46,3	50	0,69	0,38	0,02–1,00	73	1,0
Ni	14,7	2,7–28,1	43	1,08	0,21	0,02–0,89	125	1,4
	15,4	3,5–23,2	45	0,57	0,11	0,02–0,35	89	1,0
Co	5,3	0,6–14,0	53	1,76	1,32	0,08–2,61	57	25
	6,3	1,3–9,9	42	0,54	0,16	0,002–0,45	58	2,5
Cr	26,6	10,6–86,9	55	1,93	0,66	0,22–1,38	60	2,5
	39,3	17,0–84,3	38	0,83	0,39	0,05–0,95	60	1
Fe	7500	2500–14700	39	1,10	23,1	1,24–92,9	77	0,3
	9577	6060–16300	26	0,55	3,8	0,11–3,8	84	0,04
Mn	300	81–731	63	0,91	90	9,1–176,7	65	30
	206	86–600	61	0,73	90	1,10–19,50	62	4

\* Содержание в лесной подстилке.

\*\* Содержание в минеральной толще почвы до глубины 30 см.

Относительно концентрации металлов в минеральных горизонтах изучаемых почв наиболее низкое содержание большинства элементов (кроме свинца и хрома) выявлено в подзоле иллювиально-железистом по сравнению с остальными почвами.

Подвижными формами микроэлементов почвы обеспечены слабо (табл. 3.1.2). Содержание подвижных форм меди, никеля, хрома и железа не превышает 1 % от их общего содержания.



**Рис. 3.1.1.** Коэффициенты концентрации микроэлементов в лесных подстилках (Kk1) и минеральных горизонтах (Kk2) почв ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин

**Fig. 3.1.1.** Coefficients of concentration of trace elements in forest litters (Kk1) and mineral horizons (Kk2) of soils in lacustrine and glaciolacustrine valley landscapes

Концентрация **кадмия** в лесных подстилках изучаемых почв в среднем находится на уровне 0,77 мг/кг, коэффициент концентрации больше единицы – Kk1 = 1,54, для минеральных горизонтов данных нет. Диапазон его содержания широкий – от 0,11 до 1,55 мг/кг, коэффициент вариации высокий – V = 56 %, т. е. прослеживается неравномерное пространственное распределение данного металла. Кадмий характеризуется очень высокой подвижностью. Среднее содержание подвижного кадмия – 0,07 мг/кг, что составляет 68 % от его общего количества.

**Свинец** в изучаемых почвах содержится на невысоком уровне, не превышает фоновые показатели как в органогенных (Kk1 = 0,51), так и в минеральных подподстилочных горизонтах (Kk2 = 0,33).

Варьирование концентрации свинца высокое, коэффициент вариации превышает 40 %, диапазон колебания значений широкий. Так же, как и для кадмия, обнаружено незначительное различие почв по содержанию свинца, но каждая изучаемая почва характеризуется высокой пространственной неоднородностью относительно концентрации свинца, исключение составляет бурозем вторично-задернованный. В подвижной форме свинец в среднем содержится на уровне 0,17 мг/кг, что составляет от общего количества элемента 2,5 %. В органогенных горизонтах свинец более подвижен – 1,13 мг/кг – 10 % от общей концентрации.

Содержание **меди** в почвах ландшафта отличается значительной вариабельностью –  $V = 57 \%$  для минеральных горизонтов. В среднем количество меди находится на уровне 32 мг/кг в лесных подстилках и 19 мг/кг в минеральных горизонтах изучаемых почв. Коэффициенты концентрации высокие –  $K_{k1} = 2,83$  и  $K_{k2} = 1,08$ , т. е. выявлено повышенное содержание элемента, особенно это характерно для лесных подстилок.

Наибольшая концентрация меди наблюдается в минеральных горизонтах перегнойно-грунтово-глеевых почв – 33 мг/кг. Меньшее содержание меди характерно для буроземов вторично-задернованных, в среднем 28,7 мг/кг, и для элювиально-грунтово-глеевых почв – 22,3 мг/кг. Подзолы иллювиально-железистые являются наиболее бедными медью. В среднем содержание меди в них составляет 4,4 мг/кг.

Содержание подвижной меди в минеральных горизонтах почв ландшафта очень низкое – в среднем 0,29 мг/кг, это составляет 0,9 % от ее общей концентрации. Слабо обеспечены подвижной медью и элювиально-грунтово-глеевые почвы – 0,3 мг/кг. Низкая концентрация подвижной формы меди характерна и для буроземов оглеенных – 0,26 мг/кг. Наиболее низкие значения подвижной меди обнаружены в подзолах – в среднем 0,03 мг/кг, что составляет 0,45 % от общего содержания меди. Наибольшие значения содержания подвижной меди характерны для органогенных горизонтов почв – в подстилке перегнойно-грунтово-глеевых почв ее величина достигает 1,0–2,3 мг/кг.

Концентрация **цинка** в органогенных и минеральных горизонтах почв ландшафта находится на уровне 26 мг/кг в среднем, одна-

ко его количество варьирует в широких пределах, коэффициент вариации высокий – более 40 %. Коэффициенты концентрации данного элемента низкие –  $K_{k1} = 0,41$  и  $K_{k2} = 0,69$ .

Самое высокое содержание цинка – 42 мг/кг – выявлено в минеральных горизонтах перегнойно-грунтово-глеевых почв, коэффициент концентрации превышает единицу  $K_{k2} = 1,2$ . В элювиально-грунтово-глеевых почвах цинка немного меньше – в среднем 34,8 мг/кг,  $K_{k2} = 0,95$ . В буроземах оглеенных концентрация цинка в среднем составляет 22,7 мг/кг. Очень низкие значения содержания цинка отмечены в подзолах иллювиально-железистых – 8,1 мг/кг,  $K_{k2} = 0,2$ .

Концентрация подвижного цинка в минеральных горизонтах почв ландшафта низкая – 0,35 мг/кг, эта величина составляет 2,0 % от его общего содержания. Для всех почв характерно наибольшее накопление микроэлемента в подвижной форме в органогенных горизонтах – до 30 % от общего содержания, а в подстилках перегнойно-грунтово-глеевых почв этот показатель повышается до 50 %. Вариабельность подвижного цинка в почвах очень велика –  $V = 127$  %.

Содержание **никеля** в органогенных и минеральных горизонтах почв ландшафта невысокое, составляет в среднем 14,7 и 15,4 мг/кг, соответственно, его концентрация изменяется в широких пределах – от 3 до 28 мг/кг, коэффициент вариации более 40 %. Коэффициенты концентрации никеля, рассчитанные для органогенных горизонтов, превышают единицу –  $K_{k1} = 1,08$ , тогда как для минеральных горизонтов данный показатель намного меньше –  $K_{k2} = 0,57$ .

Элювиально-грунтово-глеевая почва и буроземы оглеенные характеризуются почти одинаковым уровнем концентрации никеля в минеральных горизонтах – 18,8 и 16,3 мг/кг, соответственно. В перегнойно-грунтово-глеевых почвах содержание никеля выше – 27,3 мг/кг.

Среднее содержание никеля в подвижной форме в минеральных горизонтах изучаемых почв находится на уровне 0,11 мг/кг, что в среднем составляет 1 % от его общего содержания. Коэффициент вариации очень высокий – 89 %, что характеризует неоднородную обеспеченность почв этого типа ландшафта подвижным никелем. В органогенных горизонтах подвижного никеля содержится больше – до 0,9 мг/кг (в подстилке элювиальной почвы), что составляет 5 % от его общего количества. С глубиной содержание подвижного никеля уменьшается до 0,17–0,23 мг/кг.

Среднее содержание **кобальта** в почвах ландшафта находится на уровне 5,3 в органогенных и 6,3 мг/кг – в минеральных горизонтах. Варьирование элемента в почвах ландшафта высокое – коэффициент вариации превышает 40 %. Коэффициент концентрации металла в подстилках показывает превышение фонового значения почти в два раза –  $K_{k1} = 1,76$ , для минеральных горизонтов данный показатель значительно ниже –  $K_{k2} = 0,54$ .

Наибольшая концентрация кобальта среди почв данного типа ландшафта характерна для минеральных горизонтов перегнойно-грунтово-глеевой почвы – в среднем 12,4 мг/кг ( $K_{k2} = 1,1$ ). Немного меньшее содержание кобальта, чем в вышерассмотренной почве, в элювиально-грунтово-глеевых почвах – 7,8 мг/кг и буроземах вторично-задернованных – в среднем 6,2 мг/кг. Очень низкие концентрации данного элемента в подзолах – 2,0 мг/кг., что, главным образом, зависит от очень низкого содержания кобальта в почвообразующих породах, на которых формируются данные почвы.

Диапазон содержания подвижного кобальта в минеральной толще почвах ландшафта очень широкий – 0,012–0,45 мг/кг, коэффициент вариации составляет 58 %. Наибольшая его концентрация характерна для органогенных горизонтов почв – доля от общего содержания составляет 15,7–19,0 % в буроземах и подзолах, достигая 42 % в подстилках элювиально-грунтово-глеевых и перегнойно-грунтово-глеевых почв.

Средняя концентрация **хрома** в органогенных горизонтах почв ландшафта почв составляет 26,6 мг/кг, а в минеральных подподстилочных – 39,3 мг/кг, коэффициент концентрации металла в подстилках почти в два раза превышает фоновые значения –  $K_{k1} = 1,93$ , а в минеральных горизонтах он близок к единице –  $K_{k2} = 0,83$ . Пределы содержания хрома широкие, коэффициенты вариации особенно высокие для органогенных горизонтов –  $V = 55$  %.

Выявлен высокий уровень концентрации хрома в подстилках подзолов – 43,9 мг/кг, т. е. превышает фоновые значения в три раза –  $K_{k1} = 3,1$ . Для минеральных горизонтов данных почв также характерно высокое содержание хрома – 53,1 мг/кг,  $K_{k2} = 1,1$ . Это является следствием высокого содержания хрома в почвообразующей породе, на которой они формируются. Несколько меньшая концентрация хрома выявлена в минеральных горизонтах перегнойно-грунтово-глее-

вых – 47,1 мг/кг и элювиально-грунтово-глеевых почв – 40,3 мг/кг. В буроземах содержание хрома меньше, чем в вышерассмотренных почвах, и составляет в среднем 29,7 мг/кг.

Количество подвижного хрома в минеральных горизонтах почв ландшафта низкое, в среднем 0,39 мг/кг, что составляет 1,0 % от его общего содержания. Диапазон колебания очень широк – 0,05–0,95 мг/кг, коэффициент вариации достигает 60 %.

Средняя концентрация **железа** в почвах данного типа ландшафта составляет 7500 и 9577 мг/кг в органогенных и минеральных горизонтах соответственно. Относительно фоновых показателей содержания элемента в почвах Карелии рассчитаны следующие коэффициенты концентрации:  $K_{k1} = 1,1$  и  $K_{k2} = 0,55$ , т. е. лесные подстилки изучаемых почв характеризуются концентрацией металла на уровне фоновых концентраций.

Среди почв ландшафта наибольшее количество железа выявлено в минеральных горизонтах элювиально-грунтово-глеевых и перегнойно-грунтово-глеевых почв – 11 100–11 300 мг/кг ( $K_{k2} = 0,65$ ). Концентрация железа в буроземах не намного меньше – в среднем 9200 мг/кг. Для подзолов характерна наименьшая концентрация железа – 7354 мг/кг.

Подвижного железа в почвах ландшафта содержится очень мало – 1,1 мг/кг, что составляет 0,04 % от его общего содержания. Широкий диапазон значений, 0,11–3,80 мг/кг, наряду с высоким коэффициентом вариации – 84 %, свидетельствует о неоднородной обеспеченности подвижной формой железа почв ландшафта.

Содержание **марганца** в почвах ландшафта невысокое, в среднем его концентрация составляет 300 в органогенных и 206 мг/кг в минеральных горизонтах, коэффициенты концентрации близки к единице:  $K_{k1} = 0,91$  и  $K_{k2} = 0,73$ . Разброс данных очень широкий – 80–700 мг/кг, коэффициенты вариации высокие –  $V > 60$  %.

В минеральных горизонтах элювиально-грунтово-глеевых и перегнойно-грунтово-глеевых почв наблюдаются наибольшие концентрации марганца – в среднем 250–270 мг/кг ( $K_{k1} = 0,9$ –1). Меньшее количество марганца содержится в буроземах – в среднем 200 мг/кг. Более низкое его содержание отмечено в минеральных горизонтах подзолов – 135 мг/кг, однако для лесной подстилки данной почвы характерны достаточно высокие его значения – 460 мг/кг ( $K_{k1} = 1,5$ ).

Марганец по сравнению с другими рассмотренными микроэлементами является наиболее подвижным элементом. Среднее его содержание в почвах ландшафта невысокое – 9,0 мг/кг для минеральной толщи почв, доля от общего достигает 4,2 %, концентрация же его в органогенных горизонтах достигает 100–150 мг/кг, что составляет почти половину его общего содержания.

*Ландшафт денудационно-тектонический грядовый (сельговый) среднезаболоченный с преобладанием сосновых местообитаний*

Данный тип ландшафта отличается разнообразием почвообразующих пород и резкой их сменой в пространственном направлении, поэтому для них выявлено высокое варьирование микроэлементного состава. Концентрация большинства микроэлементов, кроме свинца, наибольшая в суглинистой морене (табл. 3.1.3). Супесчаная морена характеризуется очень низкими концентрациями всех изучаемых микроэлементов.

**Таблица 3.1.3.** Общее содержание микроэлементов в почвообразующих породах ландшафта денудационно-тектонического грядового

**Table 3.1.3.** Trace element content in parent rocks of a tectonic denudation ridge landscape

Порода	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Fe	Mn
Элюво-делювий, n = 3	0,01	9,2	13,9	17,5	12,2	5,2	19,2	7420	174
Суглинистая морена, n = 3	0,03	8,1	35,2	29,9	15,3	6,8	19,9	7720	300
Супесчаная морена, n = 4	0,01	4,5	4,0	9,2	4,7	1,6	10,8	5015	88

Почвенный покров денудационно-тектонического грядового ландшафта, как говорилось выше, отличается мелкоконтурностью и разнообразием почв. Это обуславливает существенное различие почв по содержанию микроэлементов (табл. 3.1.4).

Выявлено, что почвы данного типа ландшафта менее обеспечены микроэлементами, чем почвы ландшафта озерно-ледниковых равнин, только концентрация марганца немного выше. Это характерно как для лесных подстилок, так и для минеральных подподстилочных горизонтов почв. Высокие коэффициенты вариации говорят о сильной пространственной неоднородности почв ландшафта относительно содержания в них микроэлементов.

**Таблица 3.1.4.** Содержание микроэлементов в почвах ландшафта денудационно-тектонического грядового

**Table 3.1.4.** Trace element content in soils of a tectonic denudation ridge landscape

Эле- мент	Среднее	Пределы	V, %	Кк1/2	Среднее	Пределы	V, %	% от общего содержания
	мг/кг				мг/кг			
	Общее содержание				Содержание в подвижной форме			
Cd	0,12*	0,005–0,2	44	0,24	0,02	0,002–0,08	112	16,7
	—**	—	—	—	0,002	0,0001–0,008	134	7,0
Pb	17,8	9,4–24,7	24	0,78	0,26	0,05–0,49	53	1,5
	9,0	1,7–15,4	39	0,58	0,05	0,01–0,17	76	0,6
Cu	10,3	4,7–28,1	56	0,91	0,86	0,04–4,14	135	8,3
	19,0	3,5–70,3	80	1,03	0,10	0,07–0,30	50	0,5
Zn	30,5	5,5–56,1	39	0,48	18,5	2,2–38,6	52	60,7
	20,8	14–27,0	20	0,56	0,91	0,06–1,30	50	5,5
Ni	10,2	3,3–17,0	31	0,75	1,9	0,23–3,2	52	18,6
	12,7	7,0–17,8	30	0,40	0,23	0,01–0,60	74	1,8
Co	1,2	0,3–3,9	78	0,40	0,81	0,02–2,02	64	67,5
	3,5	2,6–6,4	40	0,30	0,13	0,05–0,40	31	6,3
Cr	8,6	3,5–17,4	38	0,62	0,5	0,23–1,23	49	3,8
	17,8	9–35	31	0,38	0,17	0,05–0,23	30	1,0
Fe	3540	1500–6100	35	0,52	3,41	0,45–11,10	131	0,1
	6600	4650–8650	15	0,38	0,15	0,05–0,50	80	0,002
Mn	682	171–1600	61	2,07	241	36–346	37	35,4
	305	60–780	80	1,08	17,3	0,64–18,71	80	7,7

\* Содержание в лесной подстилке.

\*\* Содержание в минеральной толще почвы до глубины 30 см.

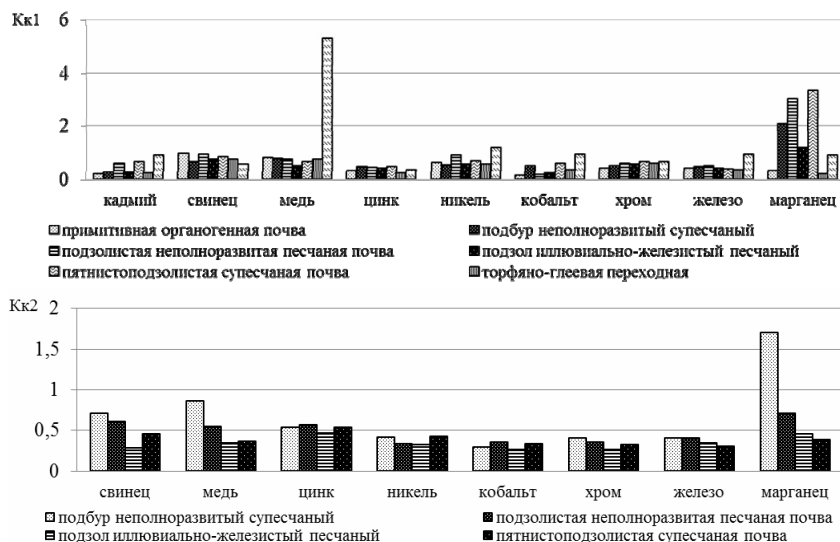
Содержание большинства микроэлементов в лесных подстилках и минеральных подподстилочных горизонтах почв данного ландшафта находится, в основном, ниже их фоновых концентраций. Выделяется высокий коэффициент концентрации для меди ( $K_{к1} = 5,4$ ) в торфяно-глеевой низинной почве (рис. 3.1.2). Также содержание марганца в лесных подстилках почти всех изучаемых почв превышает фоновый уровень ( $K_{к1} = 2–3$ ).

По сравнению с почвами ландшафта озерно-ледниковых равнин выявлено более низкое содержание подвижных форм большинства микроэлементов (табл. 3.1.4).

Концентрация **кадмия** в лесных подстилках почв данного типа ландшафта низкая – 0,12 мг/кг, коэффициент вариации высокий – 44 %. Наибольшая концентрация кадмия выявлена в торфяно-глее-



вых почвах, особенно высоко содержание его в торфяно-глеевой низинной почве – 0,47 мг/кг. В подвижной форме кадмий также содержится в меньших количествах, чем в почвах вышерассмотренного типа ландшафта, – 0,02 мг/кг, что составляет 7 % от его общего количества.



**Рис. 3.1.2.** Коэффициент концентрации микроэлементов в минеральных подподстилочных горизонтах почв ландшафта денудационно-тектонического грядового

**Fig 3.1.2.** Coefficients of concentration of trace elements in forest litters (Kk1) and upper mineral horizons (Kk2) of soils in a tectonic denudation ridge landscape

Уровень содержания **свинца** в почвах данного типа ландшафта почти в два раза выше, чем в почвах предыдущего, – 17,8 мг/кг (Kk1 = 0,78) в органогенных горизонтах и 9 мг/кг (Kk2 = 0,58) в минеральных. Диапазон колебания содержания элемента очень широкий. Наибольший уровень концентрации свинца обнаружен в почвах органогенного происхождения – примитивной и торфяных почвах – 13–20 мг/кг, а наименьший – в подзоле иллювиально-железистом – 4,4 мг/кг.

В подвижной форме свинец содержится в меньших количествах, чем в почвах ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин, – 0,05 мг/кг, что составляет 0,6 % от общего содержания элемента. Торфяные почвы характеризуются самыми высокими значениями содержания подвижного свинца – 0,2–0,6 мг/кг, относительно его общей концентрации этот показатель составляет 3–5 %.

Среднее содержание *меди* в органогенных горизонтах почв данного типа ландшафта ниже по сравнению с ландшафтом озерных и озерно-ледниковых равнин – 10,3 мг/кг ( $K_{k1} = 0,91$ ), а концентрация данного металла в минеральных подподстилочных горизонтах находится на одном уровне с данными для почв вышерассмотренного ландшафта – 19,0 мг/кг ( $K_{k2} = 1,03$ ). Коэффициент вариации содержания меди в почвах данного типа ландшафта достигает 80 %, что говорит о сильном варьировании ее содержания в пространственном направлении.

Содержание меди в почвах, сформированных на элюво-делювии коренных пород, невысокое, в органогенных горизонтах в среднем 9 мг/кг, в минеральных горизонтах подбура – 16,0 мг/кг, подзолистых неполноразвитых почвах ниже – 10,3 мг/кг. В примитивных органогенных почвах концентрация меди также находится на низком уровне – 9,4 мг/кг.

Для почв, развитых на плаще морены, выявлены значительные различия в содержании меди. В подзолах иллювиально-железистых и пятнисто-подзолистых почвах содержание элемента низкое – 6,5 и 6,9 мг/кг ( $K_{k2} = 0,4$ ). В торфяно-глеевых почвах содержание меди резко различается в зависимости от происхождения торфа. В торфяно-глеевых переходных отмечается очень низкое содержание меди – 8,8 мг/кг, в то время как в торфяно-глеевых низинных почвах концентрация меди намного выше – 60,3 мг/кг ( $K_{k1} = 5,3$ ), 90–110 мг/кг в нижних слоях торфа, таким образом, данные почвы можно охарактеризовать как очень богатые медью.

Содержание меди в подвижной форме в почвах ландшафта низкое – в среднем менее 0,1 мг/кг, что составляет 0,5 % от ее валовой концентрации. Наибольшее количество подвижной меди свойственно органогенным горизонтам почв (лесной подстилке) и торфяно-глеевым почвам.

**Цинк** в почвах ландшафта содержится в небольших количествах, в среднем 30,5 и 20,8 мг/кг в подстилках и минеральных горизонтах, соответственно, кларки концентрации ниже единицы –  $K_{к1}$  и  $K_{к2} = 0,5$ . Содержание данного микроэлемента в минеральных горизонтах почв варьирует в нешироком диапазоне – 14,0–27,0 мг/кг, коэффициент вариации относительно невысокий – 20 %. Для лесной подстилки характерна более высокая вариабельность от 5 до 56 мг/кг,  $V = 39$  %.

В почвах, сформированных на элюво-делювии коренных пород (примитивных, подбурах и подзолистых неполноразвитых почвах), концентрация цинка находится на уровне 30 мг/кг в органогенных и 20 мг/кг в минеральных горизонтах. Для подзолов иллювиально-железистых и пятнисто-подзолистых почв установлены такие же показатели.

В торфяно-глеевых почвах содержание цинка, так же как и меди, сильно различается в зависимости от происхождения почвы. В торфяно-глеевой переходной среднее количество элемента составляет 15,6 мг/кг, в то время как в торфяно-глеевой низинной содержание цинка выше – 25,0 мг/кг.

В минеральных горизонтах почв цинка в подвижной форме содержится немного – 0,9 мг/кг, что составляет 5 % от его среднего общего содержания. Намного больше подвижного цинка находится в органогенных горизонтах почв – 10–20 мг/кг, что составляет 60–80 % от его общего содержания.

Концентрация **никеля** в почвах данного ландшафта немного меньше, чем в почвах ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин, – 10–12 мг/кг. Коэффициенты концентрации меньше единицы –  $K_{к1} = 0,75$  и  $K_{к2} = 0,40$ . Пределы изменения концентрации никеля достаточно широкие – 4,0–17,4 мг/кг. Во всех минеральных почвах содержание никеля находится примерно на одном уровне – 9–11 мг/кг. В торфяно-глеевой переходной почве концентрация микроэлемента немного ниже – 7,0 мг/кг. Торфяно-глеевая низинная характеризуется более высокими значениями никеля – 14,5 мг/кг.

Подвижного никеля в минеральных горизонтах почв ландшафта содержится немного – среднем 0,23 мг/кг, что составляет 1,8 % от его общего содержания. В пятнисто-подзолистых почвах количество подвижного никеля низкое и находится на уровне 0,2 мг/кг, еще

меньшее количество подвижного никеля выявлено в подзоле иллювиально-железистом – 0,08 мг/кг. В подстилках подбуров и подзолистых неполноразвитых почв концентрация его достаточно высокая – 1,0–1,7 мг/кг, что составляет до 29 % от его общего содержания.

Среднее содержание **кобальта** в минеральных горизонтах почв ландшафта невысокое и находится на уровне 3,5 мг/кг ( $K_{k2} = 0,4$ ), это почти в два раза ниже концентрации микроэлемента в почвах ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин. Лесные подстилки характеризуются еще меньшими величинами содержания кобальта – 1,2 мг/кг ( $K_{k1} = 0,3$ ). Диапазон колебания содержания кобальта достаточно широкий, коэффициенты вариации высокие – 78 % для лесной подстилки и 40 % для минеральных горизонтов.

Наименьшая концентрация микроэлемента отмечена в примитивной органогенной почве – 0,5 мг/кг. В торфяно-глеевых почвах величины содержания кобальта также низкие: 1,1 мг/кг в торфяно-глеевой переходной и 2,9 мг/кг в торфяно-глеевой низинной.

Кобальт в подвижной форме в минеральных горизонтах почв содержится в небольших количествах – 0,13 мг/кг. Наибольшая его концентрация характерна для органогенных горизонтов почв. В подстилке подбуров содержание подвижного кобальта достигает 1,5 мг/кг, что составляет 80 % от его общего содержания. В торфяно-глеевых почвах количество подвижного кобальта находится на уровне 1,0 мг/кг, доля от общего содержания достигает 90 %.

**Хрома** в минеральных горизонтах почв ландшафта содержится очень мало – 17,8 мг/кг ( $K_{k2} = 0,38$ ), лесные подстилки характеризуются еще более низкими уровнями его концентрации – 8,6 мг/кг ( $K_{k1} = 0,62$ ). Коэффициенты вариации высокие – более 30 %. В минеральных почвах, развитых на элюво-делювии коренных пород (подбурах и подзолистой неполноразвитой почве), содержание хрома в среднем составляет 17–19 мг/кг. Концентрация хрома в почвах, развитых на плаще морены, меньше – 13–15 мг/кг. В торфяно-глеевых почвах содержание хрома также невысокое и находится на уровне 9,0 мг/кг.

Подвижного хрома в почвах ландшафта содержится очень мало – 0,17 мг/кг, что составляет 1 % от его общего содержания. Диапазон изменения его количества широкий – 0,07–0,33 мг/кг. Наибольшее

его содержание характерно для органогенных горизонтов почв – 0,47 мг/кг, это составляет почти 7 % от общего количества.

**Железа** в почвах ландшафта содержится меньше, чем в почвах ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин, – 3540 мг/кг в лесных подстилках и 6600 мг/кг в минеральных горизонтах. Соответственно, коэффициенты концентрации низкие –  $K_{k1}$  и  $K_{k2} = 0,4\text{--}0,5$ . Невысокий коэффициент вариации содержания железа в минеральных горизонтах почв ландшафта –  $V = 15\%$  – говорит о незначительных пространственных изменениях, для лесной подстилки выявлено более значительное варьирование,  $V = 35\%$ .

Самые низкие значения содержания железа выявлены в примитивных почвах – 3000 мг/кг, но данная величина характерна для всех органогенных горизонтов изучаемых почв. В подбурах и подзолистых почвах, развитых на элюво-делювии коренных пород, содержание железа также невысокое – 7100 мг/кг. В пятнисто-подзолистых почвах и подзолах иллювиально-железистых содержание железа более низкое, чем в почвах, развитых на коренных породах, – 5450 и 6200 мг/кг, соответственно. Торфяно-глеевые почвы данного типа ландшафта сильно различаются по содержанию железа. Торфяно-глеевая переходная почва характеризуется низкими величинами элемента – 2700 мг/кг. Торфяно-глеевая низинная почва железа содержит больше – 6500 мг/кг, в нижних слоях торфа – до 8800 мг/кг.

Концентрация железа в подвижной форме в почвах ландшафта низкая – 0,15 мг/кг, что составляет 0,002 % от общего его содержания, это в несколько раз ниже, чем в почвах ландшафта озерно-ледниковых равнин. В отличие от общего содержания железа для подвижного железа выявлен очень высокий коэффициент вариации –  $V = 80\%$ .

**Марганца** в почвах данного ландшафта содержится немногим больше, чем в почвах озерного и озерно-ледникового ландшафта, в лесных подстилках – 682 мг/кг и в минеральных горизонтах – 305 мг/кг. Коэффициенты концентрации превышает единицу –  $K_{k1} = 2,07$  и  $K_{k2} = 1,08$ , соответственно, т. е. относительно фоновых значений выявлено повышенное содержание металла. Однако диапазон содержания марганца здесь широкий – 60–1600 мг/кг, коэффициенты вариации очень высокие – 60–80 %.

Примитивные органогенные почвы характеризуются очень низкими величинами содержания марганца – 100–130 мг/кг. Наиболее высо-

кими значениями содержания марганца отличаются минеральные горизонты подбуров – в среднем 480 мг/кг. Концентрация марганца в подзолистых неполноразвитых почв меньше и составляет 200 мг/кг. В почвах, развитых на морене, – подзолах иллювиально-железистых и пятнисто-подзолистых почвах – содержание марганца очень низкое – 110–130 мг/кг. В торфяно-глеевой верховой его количество очень низкое – 81 мг/кг, а в торфяно-глеевой низинной концентрация микроэлемента значительно выше – в среднем 300 мг/кг.

Подвижного марганца в минеральных горизонтах почв ландшафта содержится в пределах от 2,2 до 31,5 мг/кг, коэффициент вариации – 52 %. В среднем относительно общего содержания марганца доля подвижной его формы в минеральных горизонтах составляет 7,7 %. Наибольшие величины концентрации микроэлемента характерны для органогенных горизонтов – 80–270 мг/кг, что составляет от 20 до 90 % от его общего содержания. В минеральной толще почв марганец распределен равномерно – в подподстилочных горизонтах наблюдается резкое снижение его количества в несколько раз по сравнению с вышележащими органогенными горизонтами, ниже по профилю, в иллювиальных горизонтах, его количество постепенно уменьшается.

*Ландшафт ледниковый холмисто-грядовый среднезаболоченный с преобладанием еловых местообитаний*

Почвообразующие породы данного ландшафта (песчаная и супесчаная морена) отличаются низкими концентрациями большинства изучаемых микроэлементов (табл. 3.1.5). Выявлено очень низкое содержание меди, цинка и железа, особенно по сравнению с почвообразующими породами рассмотренных выше ландшафтов, кроме супесчаной морены денудационно-тектонического типа ландшафта.

**Таблица 3.1.5.** Общее содержание микроэлементов в почвообразующих породах ландшафта ледникового холмисто-грядового  
**Table 3.1.5.** Trace element content in parent rocks of a hilly-ridge glacial landscape

Порода	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Fe	Mn
Песчаная и супесчаная морена, n = 3	4,2	8,38	13,14	11,6	4,86	16,1	3815	112

Почвы ландшафта ледникового холмисто-грядового также характеризуются самыми низкими величинами содержания в них изучаемых микроэлементов (табл. 3.1.6), особенно они бедны медью, марганцем и железом. Также по сравнению с вышерассмотренными ландшафтами для минеральных горизонтов почв данного типа ландшафта отмечаются самые низкие коэффициенты вариации содержания микроэлементов. Это говорит о более равномерном распределении их в пространстве, только для кадмия, меди и марганца коэффициенты концентрации наиболее высокие – более 30 %.

Доля подвижной формы микроэлементов от их общего содержания в большинстве случаев превышает 1 %, но, рассматривая абсолютные величины, их содержание можно охарактеризовать как низкое (табл. 3.1.6).

**Таблица 3.1.6.** Содержание микроэлементов в почвах ландшафта ледникового холмисто-грядового

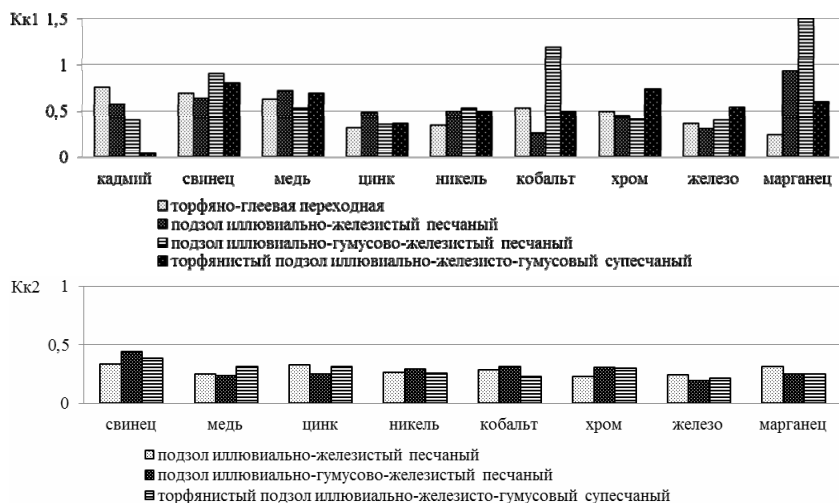
**Table 3.1.6.** Trace element content in soils of a hilly-ridge glacial landscape

Элемент	Среднее	Пределы	V, %	Ккф	Среднее	Пределы	V, %	% от общего содержания
	мг/кг				мг/кг			
	Валовое содержание				Содержание в подвижной форме			
Cd	0,24*	0,02–0,48	50	0,48	0,08	0,01–0,16	72	33
	—**	—	—	—	0,01	0,003–0,03	69	—
Pb	17,1	5,4–28,1	41	0,75	4,41	0,80–7,20	40	26
	5,6	3,6–10,0	40	0,36	0,37	0,04–1,0	68	7
Cu	7,1	1–15	52	0,63	1,91	0,01–4,61	85	27
	6,0	2,0–9,8	36	0,32	0,21	0,01–0,6	103	3,3
Zn	24,2	7,2–36,9	40	0,38	16,8	5,0–24,1	31	70
	9,3	8,4–10,4	11	0,25	0,25	0,09–0,30	63	2,0
Ni	6,5	2,2–9,1	29	0,48	0,90	0,03–2,1	62	13,8
	7,4	4,2–9,2	22	0,27	0,11	0,03–0,16	36	2,2
Co	2,0	0,3–4,7	64	0,66	0,22	0,002–0,57	97	11
	3,0	1,6–4,0	23	0,26	0,05	0,002–0,13	73	2,4
Cr	8,2	2,2–17,7	42	0,59	0,84	0,04–2,0	68	10
	12,5	7,8–18,4	23	0,26	0,28	0,14–0,45	39	2,4
Fe	3200	1600–5700	39	0,47	44,5	5–100	63	1,4
	3500	2815–5340	20	0,20	7,80	2,06–20,25	70	0,2
Mn	235	110–500	48	0,71	111	21–210	58	47
	80	39–115	31	0,28	0,81	0,20–4,80	73	1,5

\* Содержание в лесной подстилке.

\*\* Содержание в минеральной толще почвы до глубины 30 см.

Рассчитанные коэффициенты концентрации (рис. 3.1.3) микроэлементов в лесных подстилках и минеральных подподстилочных горизонтах почв данного типа ландшафта очень низкие, в среднем не превышают 1, особенно низкие коэффициенты концентрации получены для минеральных горизонтов всех изучаемых почв –  $K_{k2} = 0,2-0,4$ .



**Рис. 3.1.3.** Коэффициенты концентрации микроэлементов в лесных подстилках ( $K_{k1}$ ) и минеральных горизонтах ( $K_{k2}$ ) почв ледникового холмисто-грядового типа ландшафта

**Fig. 3.1.3.** Coefficients of concentration of trace elements in forest litters ( $K_{k1}$ ) and mineral horizons ( $K_{k2}$ ) of soils in a hilly-ridge glacial landscape

В среднем **кадмий** в лесных подстилках почв данного типа ландшафта содержится на уровне 0,24 мг/кг. Варьирование содержания элемента очень широкое – от 0,02 до 0,48 мг/кг, коэффициент вариации достигает 50 %. Наибольшие величины концентрации кадмия отмечены в торфяно-глеевых переходных почвах – 0,38 мг/кг.

В подвижной форме содержание кадмия находится на уровне 0,01 мг/кг, что составляет 17 % от его общего содержания. Варьирование концентрации подвижной формы металла высокое –  $V = 69 \%$ , диапазон колебания содержания широкий – от 0,003 до 0,03 мг/кг.



Концентрация **свинца** в почвах данного типа ландшафта немного выше содержания его в почвах озерного и озерно-ледникового равнинного и находится в среднем на уровне 17,1 мг/кг в органогенных горизонтах и 5,6 мг/кг в минеральных. Относительно фоновых значений получены низкие коэффициенты концентрации –  $K_{к1} = 0,75$  и  $K_{к2} = 0,36$ . Варьирование содержания свинца широкое, коэффициент вариации превышает 40 %. Наибольшая концентрация металла характерна для торфяно-глеевых переходных почв – 15,7 мг/кг. В минеральных горизонтах подзолов эта величина намного ниже – 5,2–6,8 мг/кг.

В подвижной форме содержание свинца составляет 4,41 мг/кг в органогенных горизонтах (26 % от его общей концентрации) и 0,37 мг/кг в минеральных (7 %). Пределы содержания его очень широкие, коэффициенты вариации превышают 40 %. В торфяно-глеевых переходных почвах уровень концентрации подвижного свинца составляет 6,5 мг/кг, эта величина относительно общего содержания достигает 40 %.

Содержание **меди** в почвах ландшафта очень низкое и составляет в среднем 7,1 мг/кг в органогенных горизонтах и 6,0 мг/кг в минеральных, коэффициенты концентрации низкие –  $K_{к1} = 0,63$  и  $K_{к2} = 0,32$ , соответственно. Диапазон концентрации меди в почвах достаточно широкий, особенно в органогенных горизонтах, коэффициенты вариации превышают 50 %. Наиболее высокий уровень содержания меди среди почв данного типа ландшафта выявлен для торфяно-глеевых переходных почв – 7,1 мг/кг. В почвах подзолистого генезиса содержание меди находится на уровне 5–6 мг/кг.

В подвижной форме элемент содержится на одном уровне с почвами вышерассмотренных ландшафтов и характеризуется низкими показателями, в среднем – 1,91 мг/кг в органогенных горизонтах (27 % от общего содержания) и 0,21 мг/кг в минеральных (3,3 %).

Содержание **цинка** в почвах ландшафта невысокое, в среднем 24,2 и 9,3 мг/кг в органогенных и минеральных горизонтах, соответственно, коэффициенты концентрации очень низкие –  $K_{к1} = 0,38$ ,  $K_{к2} = 0,25$ . Варьирование содержания цинка для органогенных горизонтов широкое ( $V = 40$  %), минеральным горизонтам

изучаемых почв свойственно более однородное пространственное распределение металла ( $V = 11 \%$ ). Наибольшая концентрация микроэлемента характерна для торфяно-глеевых переходных почв – 20,1 мг/кг. В минеральных горизонтах почв подзолистого генезиса обнаружено примерно одинаковое содержание цинка – от 9,3 мг/кг в подзолах иллювиально-гумусово-железистых до 11–12 мг/кг в подзолах иллювиально-железисто-гумусовых и иллювиально-железистых.

Цинк в подвижной форме в почвах данного типа ландшафта содержится на низком уровне – 0,19 мг/кг в минеральных горизонтах почвы, что составляет 1,6 % от его общего содержания. Органогенные горизонты почв и торфяно-глеевые переходные почвы могут считаться обеспеченными подвижной формой микроэлемента, его концентрация колеблется в пределах от 8,0 до 20,0 мг/кг, что составляет 40–80 % от общего содержания цинка.

Концентрация **никеля** в почвах ландшафта низкая, в среднем его количество находится на уровне 6,5 и 7,5 мг/кг в органогенных и минеральных горизонтах, соответственно. Коэффициенты концентрации низкие –  $K_{k1} = 0,48$  и  $K_{k2} = 0,27$ . Диапазон варьирования содержания никеля неширокий – от 2 до 9 мг/кг, коэффициент вариации составляет чуть более 20 %.

Очень низкая концентрация никеля отмечена в торфяно-глеевых переходных почвах – 4,8 мг/кг. Так же как и для цинка, примерно одинаковое низкое содержание никеля характерно для почв подзолистого генезиса – 7–8 мг/кг.

Концентрация подвижного никеля в почвах ландшафта также низкая – 0,11 мг/кг, что составляет 2,2 % от его общего содержания, диапазон изменения содержания подвижного никеля широкий – от 0,03 до 0,16 мг/кг. Наибольшие величины концентрации элемента выявлены для органогенных горизонтов, но по абсолютным значениям они являются также низкими – не более 2 мг/кг, доля от общего количества достигает 17 % для лесных подстилок подзолов и 30 % для торфяно-глеевых почв.

**Кобальтом** минеральные горизонты почв ландшафта обеспечены на низком уровне, его содержание немного меньше, чем в почвах ландшафта денудационно-тектонического глядового, – 3,0 мг/кг,  $K_{k2} = 0,26$ . Органогенные горизонты характеризуются

еще более низкими величинами – 2,0 мг/кг, коэффициент концентрации  $K_{k1} = 0,66$ . Пределы колебания содержания кобальта более широкие в органогенных горизонтах (0,3–4,7 мг/кг,  $V = 64 \%$ ), чем в минеральных (1,6–4,0 мг/кг,  $V = 23 \%$ ).

Торфяно-глеевым переходным почвам свойственна очень низкая концентрация кобальта – 1,5 мг/кг, при этом в верхних слоях торфа его содержание находится на уровне 2 мг/кг, с глубиной эта величина падает до 1,3 мг/кг. Концентрация кобальта в подзолах – 2–4 мг/кг.

Кобальт в подвижной форме в минеральных горизонтах почв ландшафта содержится в очень незначительных количествах, в среднем – 0,05 мг/кг, относительно общего содержанию его доля составляет 1,7 %. Наблюдается достаточно высокое содержание кобальта в подвижной форме в торфяно-глеевых почвах – 0,8 мг/кг, до 1,7 мг/кг, доля его от общего содержания составляет 29–53 %.

Концентрация **хрома** в минеральных горизонтах почв ландшафта находится на низком уровне и составляет в среднем 12,5 мг/кг,  $K_{k2} = 0,26$ . Содержание элемента изменяется в нешироком диапазоне от 6,9 до 18,8 мг/кг,  $V = 23 \%$ . В органогенных горизонтах изучаемых почв концентрация элемента ниже – 8,2 мг/кг, но разброс данных более широкий,  $V = 42 \%$ , коэффициент концентрации  $K_{k1} = 0,59$ . Концентрация хрома в подзолах примерно одинаковая и составляет в среднем 10,7–14,5 мг/кг. Наблюдается минимум содержания микроэлемента в лесных подстилках почв подзолистого генезиса. Торфяно-глеевые почвы слабо обеспечены хромом – 6,8 мг/кг.

По содержанию хрома в подвижной форме почвы ландшафта характеризуются как необеспеченные. Среднее его содержание в минеральных горизонтах – 0,28 мг/кг, что по отношению к общему количеству составляет 2,4 %. Наиболее обеспеченными подвижной формой микроэлемента могут считаться органогенные горизонты и торфяно-глеевые переходные почвы, содержание в них подвижного хрома достигает 2,0 мг/кг.

Выявлено очень низкое содержание **железа** в почвах ландшафта ледникового холмисто-грядового, особенно по сравнению с почвами рассмотренных выше типов ландшафтов. Сред-

нее его количество составляет 3200 и 3500 мг/кг в органогенных и минеральных горизонтах, соответственно, по отношению к фоновому содержанию элемента в почвах Карелии отмечаются низкие коэффициенты концентрации  $K_{k1} = 0,47$  и  $K_{k2} = 0,20$ .

Наиболее низкая концентрация железа характерна для торфяных глеевых почв – 2481 мг/кг. Среди почв подзолистого генезиса наименьшее содержание железа выявлено в подзолах иллювиально-гумусово-железистых – 3353 мг/кг. Немного больше содержится железа в подзолах иллювиально-железисто-гумусовых – 3767 мг/кг и в подзолах иллювиально-железистых – 4250 мг/кг.

Содержание в подвижной форме железа в минеральных горизонтах почв данного ландшафта очень низкое, но по сравнению с почвами предыдущих типов ландшафтов они могут характеризоваться как самые обеспеченные подвижным железом. Средняя его концентрация находится на уровне 7,8 мг/кг, что составляет 0,16 % от общего содержания, коэффициент вариации очень высокий  $V = 70$  %. Большие количества подвижного железа выявлены в торфяно-глеевых переходных почвах – от 76 до 284 мг/кг, что достигает 6 % от его общего содержания.

Концентрация **марганца** в почвах ландшафта очень низкая, особенно по сравнению с почвами рассмотренных выше ландшафтов, – 235 мг/кг в органогенных и 80 мг/кг в минеральных подподстилочных горизонтах, коэффициенты концентрации –  $K_{k1} = 0,71$  и  $K_{k2} = 0,28$ . Варьирование содержания марганца широкое, коэффициенты вариации превышают 30 %. В торфяно-глеевых переходных почвах содержание марганца низкое – 82 мг/кг. Наибольшее количество марганца в почвах подзолистого генезиса выявлено в их подстилках – от 200 мг/кг в оторфованных подстилках подзолов иллювиально-железисто-гумусовых до 630 мг/кг в подстилках подзолов иллювиально-гумусово-железистых, т. е. наблюдается уменьшение концентрации элемента с увеличением степени заторфованности органогенного горизонта. В подподстилочных горизонтах почв содержание марганца находится на примерно одинаковом уровне – 70–88 мг/кг.

В подвижной форме марганец в минеральных горизонтах почв ландшафта содержится в низких количествах – 0,81 мг/кг, что со-

ставляет менее 1,5 % от его общего количества. Варьирование его широкое – от 0,2 до 4,8 мг/кг, коэффициент вариации очень высокий – 73 %. В торфяно-глеевых переходных почвах содержание подвижного марганца высокое – 47 мг/кг, что составляет 50 % от его общего количества. Намного больше содержится марганца в лесных подстилках подзолов – до 200 мг/кг, доля от общего содержания марганца составляет 36–52 %.

Таким образом, почвообразующие породы и почвы исследованных типов ландшафтов характеризуются разным уровнем накопления микроэлементов. По уровню их концентрации почвообразующие породы изученных ландшафтов могут быть расположены в следующем порядке – ленточные глины и суглинки > суглинистая морена денудационно-тектонического ландшафта > легкосуглинистая озерно-ледниковая морена > элюво-делювий коренных пород > ледниковая песчано-супесчаная морена > супесчаная морена денудационно-тектонического ландшафта.

Выявлено преимущественно низкое содержание в почвах изучаемых типов ландшафтов большинства микроэлементов, рассчитанные коэффициенты концентрации относительно фоновых концентраций в органогенных и минеральных горизонтах почв Карелии, в основном, ниже единицы. Только содержания отдельных микроэлементов в почвах ландшафтов озерных и озерно-ледниковых равнин и денудационно-тектонического грядового превышают фоновые значения или находятся на их уровне. Если расположить ландшафты по убыванию содержания в их почвах микроэлементов, то получится следующий ряд: ландшафт озерных и озерно-ледниковых равнин > ландшафт денудационно-тектонический грядовый > ландшафт ледниковый холмисто-грядовый.

Концентрация подвижных форм большинства микроэлементов может характеризоваться как низкая, чаще всего их доля от общего содержания не превышает 1 %. В то же время отмечается высокое содержание подвижного марганца в почвах озерного и озерно-ледникового равнинного и денудационного грядового типов ландшафтов.

### **3.2. Внутрипрофильная миграция тяжелых металлов в почвах ландшафтов среднетаежной подзоны Карелии**

### **3.2. Migration of heavy metals within soil profiles in mid-taiga landscapes of Karelia**

Многие ученые отмечают, что профиль почв в различной степени дифференцирован по микроэлементному составу (Виноградов, 1957; Ковда, 1973; Мотузова, 2009). Миграция химических элементов в ландшафте обеспечивает связь природных компонентов в единой системе на всех уровнях организации биосферы (Нечаева, 1985). Внутрипрофильная почвенно-геохимическая дифференциация элементов зависит, прежде всего, от генезиса почвы и строения его генетического профиля и свойств почв (Зырин, 1968).

Каждый генетический горизонт почвы можно охарактеризовать своим геохимическим фоном, поэтому пользоваться усредненным содержанием какого-либо химического элемента не всегда верно (Богатырев и др., 2003; Нечаева, 1985). Важнейшим фактором распределения химических элементов в ландшафтах являются геохимические барьеры. Они регулируют элементный состав потоков веществ, от них в большей мере зависит функционирование экосистем (Мотузова, 2009; Яшин и др., 2003). Для почв таежных ландшафтов важно учитывать накопление большинства микроэлементов на органосорбционном барьере – лесной подстилке (Добровольский, 1980, 1983; Зырин, 1968; Микроэлементы..., 1973; Gregorauskiene, Kadūnas, 2006). Также существенные различия в химическом составе горизонтов типичны для почв с элювиально-иллювиальным дифференцированным профилем – подзолов и подзолистых почв (Ковда, 1985).

Характерной особенностью лесных биоценозов является длительное задерживание элементов в фитомассе – общая биогеохимическая особенность всех лесных ландшафтов (Добровольский, 1980). Лесная подстилка в геохимическом отношении рассматривается как поверхностный радиальный биогеохимический микробарьер (Глазовская, 1999; Перельман, 1989). Органическое вещество подстилки является временным резервуаром, в который на определенное время выводятся из потоков миграции микроэлементы,

а также благодаря образованию органических соединений с микроэлементами в подстилке начинается перераспределение их масс с вовлечением в миграционные потоки (Добровольский, 1997).

Иллювиальные горизонты представляют собой сложный геохимический сорбционный барьер (Алексеев, Алексеев, 2003; Кузьмин, 2000), на котором накапливается большинство элементов.

Торфяники также являются сложными комплексными геохимическими барьерами (Ефремова и др., 2003). Распределение микроэлементов зачастую определяется степенью разложения торфа. Для некоторых микроэлементов выявлено увеличение их содержания в более хорошо разложившихся слоях торфа, для других характерно уменьшение.

Восстановительный глеевый барьер типичен для горизонтов почв, в которых наблюдается резкая смена окислительной обстановки анаэробной (глеевой).

Изучение дифференциации почвенного горизонта по содержанию в них микроэлементов является необходимым этапом ландшафтно-геохимического анализа территории. Важнейшим фактором распределения химических элементов в ландшафтах служат геохимические барьеры – участки биосферы, где на коротких расстояниях происходит резкое уменьшение интенсивности миграции элементов и их накопление.

*Ландшафт озерных и озерно-ледниковых равнин среднезаболоченный с преобладанием еловых местообитаний*

Радиальная миграция микроэлементов и наличие геохимических радиальных барьеров в почвах данного типа ландшафта различается в зависимости от особенностей генезиса почв (Ахметова, 2009). Существенное воздействие на внутрипрофильную миграцию микроэлементов оказывает характер почвообразующих пород: почвы, сформированные на слоистых глинах (элювиально-грунтово-глеевые, перегнойно-грунтово-глеевые), отличаются затрудненным дренажем и формированием восстановительных условий. Профиль этих почв слабоконтрастен по изменению содержания микроэлементов в горизонтах. Почвы, сформированные на морене легкого механического состава (подзолы), отличаются хорошей водопроницаемостью и формированием резко дифференцированного микроэлементного профиля.

Накопление микроэлементов в почвенной толще относительно содержания в почвообразующих породах характерно не для всех почв данного типа ландшафта. Средние по интенсивности процессы аккумуляции микроэлементов выявлены в элювиально-грунтово-глеевой почве и слабые – в буроземе глееватом вторично-задернованном. Перегнойно-грунтово-глеевая почва характеризуется выносом большинства микроэлементов, кроме меди, а подзол иллювиально-железистый – слабым накоплением цинка, марганца и кобальта и выносом остальных микроэлементов.

В процессе исследований были выявлены следующие типы радиальных барьеров, формирующихся в профилях почв данного ландшафта, – органо-сорбционный, сорбционный, восстановительный глеевый. Можно выделить две группы почв по наличию в них барьеров – одnobарьерные и многобарьерные почвы.

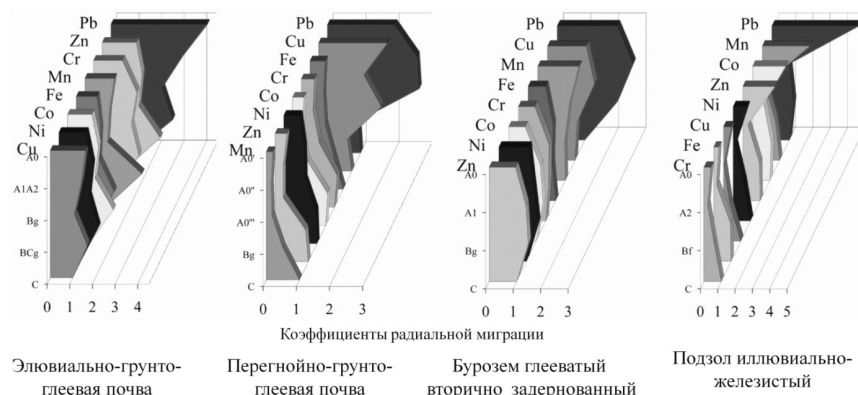
Формирование органо-сорбционного барьера характерно для перегнойно-грунтово-глеевых и подзолов. При этом в подстилке перегнойно-грунтово-глеевых почв происходит аккумуляция только свинца и меди, а в подзолах – большинства микроэлементов (кроме железа и хрома). Самые мощные сорбционные барьеры формируются в профиле подзола. В тех почвах, для которых характерно развитие глеевых процессов, выявлено наличие слабого восстановительного глеевого барьера.

Радиальная миграция микроэлементов значительно различается в зависимости от типа почвы. Почвам подзолистого генезиса свойствен элювиально-иллювиальный тип распределения большинства микроэлементов по генетическим горизонтам (рис. 3.2.1). Исключение составляет хром, содержание которого увеличивается с глубиной. Активно накапливаются в подстилке свинец, цинк, никель, марганец, в меньшей степени – кобальт. Для подзолистого горизонта типично выщелачивание всех микроэлементов, а в иллювиальном горизонте наблюдается формирование второго максимума содержания микроэлементов, особенно активно здесь накапливаются железо, марганец, цинк, свинец, кобальт.

Элювиально-грунтово-глеевые почвы и буроземы отличаются более равномерной радиальной миграцией валового содержания микроэлементов. В подстилке первых выявлена слабая аккумуля-



ции свинца, марганца и меди. В задерненной подстилке буроземов не обнаружено биогенного накопления микроэлементов (кроме марганца) и даже наблюдается вынос свинца, кобальта, хрома, меди, цинка и железа вниз по профилю.



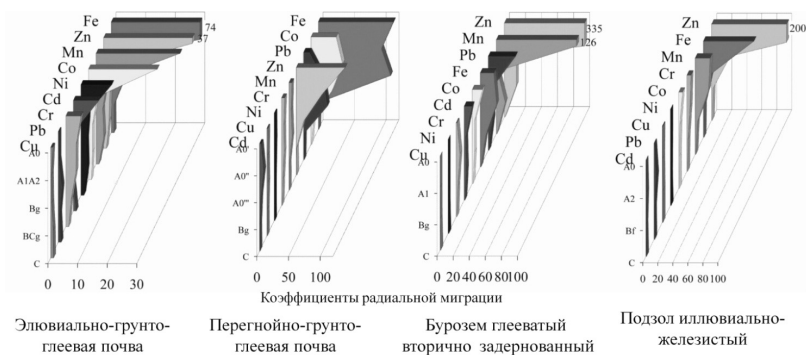
**Рис. 3.2.1.** Коэффициенты радиальной миграции общего содержания микроэлементов в почвах ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин

**Fig. 3.2.1.** Radial migration coefficients of total trace elements in soils of lacustrine and glaciolacustrine valley landscapes

Перегнойные почвы отличаются неравномерной миграцией элементов по горизонтам. В их мощной подстилке наблюдается биогенная аккумуляция только свинца и меди. В глинистом горизонте Bg, расположенном под слоем перегноя, накапливается большинство микроэлементов.

Миграция по профилю микроэлементов в подвижной форме отличается от распределения их валового содержания и характеризуется более сильной контрастностью (рис. 3.2.2).

Наиболее интенсивная аккумуляция подвижных форм микроэлементов происходит в лесных подстилках. Отмечается ярко выраженная биогенная аккумуляция элементов в органогенных горизонтах марганца, железа, кобальта и цинка. С глубиной содержание всех микроэлементов резко уменьшается. Для меди, хрома, никеля и кадмия выявлено более равномерное распределение их подвижных форм по горизонтам исследуемых почв.



**Рис. 3.2.2.** Коэффициенты радиальной миграции содержания подвижных форм микроэлементов в почвах ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин

**Fig. 3.2.2.** Radial migration coefficients of labile trace elements in soils of lacustrine and glaciolacustrine valley landscapes

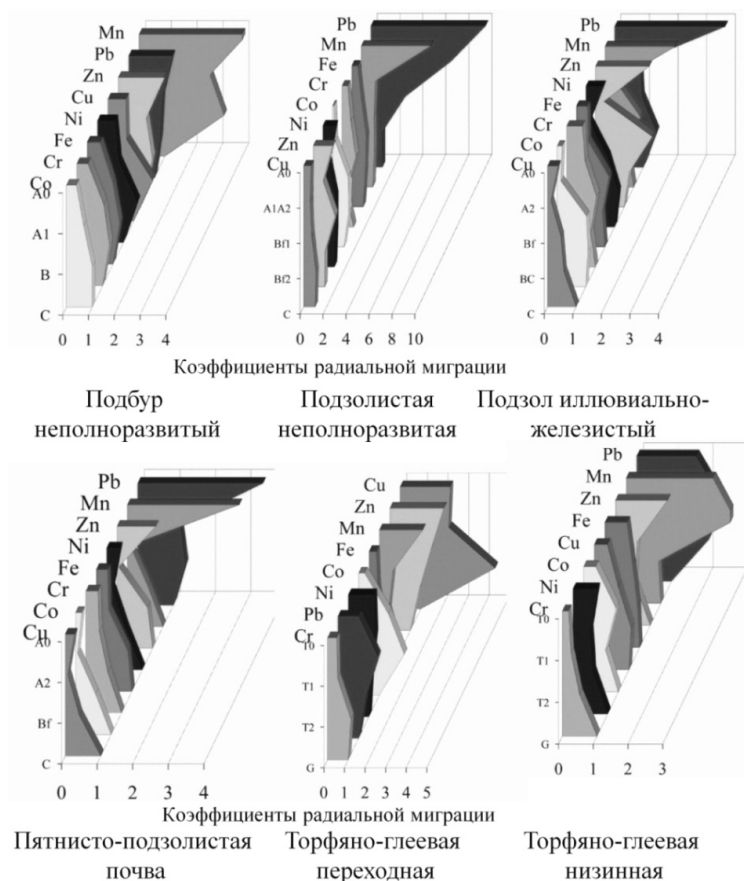
*Ландшафт денудационно-тектонический грядовый (сельговый) среднезаболоченный с преобладанием сосновых местообитаний*

В почвах данного типа ландшафта радиальная миграция микроэлементов сильно отличается в зависимости от генезиса почв, почвообразующей породы, на которой она сформировалась, и местоположения в рельефе.

Выделены следующие радиальные барьеры в профилях почв данного ландшафта: органо-сорбционный, сорбционный, восстановительный глеевый.

Миграция микроэлементов в почвах с близким подстиланием коренных горных пород вглубь затруднена, преобладает боковой сток. Почвы, развитые на моренах, характеризуются хорошим дренажем. В зависимости от почвообразующих пород и местоположения в рельефе различается общая аккумуляция микроэлементов в почвах. Для почв, развитых на элюво-делювии коренных пород, выявлено преобладание процессов аккумуляции микроэлементов в почвенной толще по сравнению с материнской породой, что связано с плохой выветрелостью материала. В почвах, развитых на морене, наблюдаются противоположные процессы – вынос большинства микроэлементов из профиля почв.

Для почв ландшафта подзолистого генезиса, развитых на моренах, характерен элювиально-иллювиальный тип распределения микроэлементов по профилю (рис. 3.2.3). В подзолистых горизонтах наблюдается резкий минимум концентрации всех микроэлементов и максимум в иллювиальных.



**Рис. 3.2.3.** Коэффициенты радиальной миграции общего содержания микроэлементов в почвах ландшафта денудационно-тектонического грядового

**Fig. 3.2.3.** Radial migration coefficients of total trace elements in soils of a tectonic denudation ridge landscape

Почвам, развитым на элюво-делювии коренных пород, свойственна более равномерная миграция микроэлементов по профилю. Не обнаружено биогенного накопления большинства микроэлементов, кроме марганца, свинца и цинка, в лесных подстилках. Вниз по профилю содержание микроэлементов незначительно увеличивается.

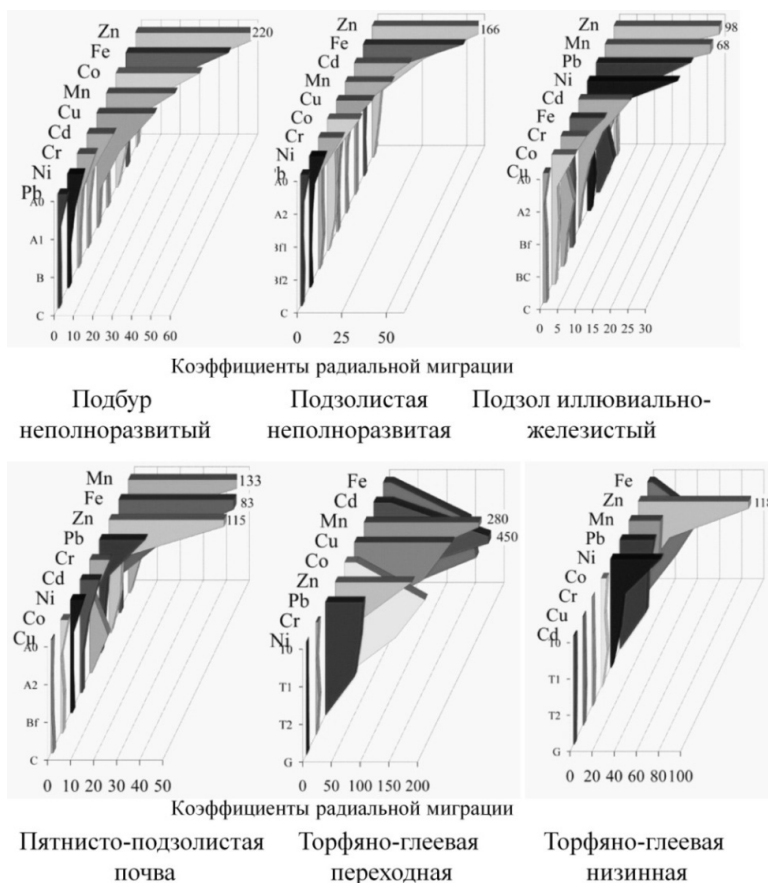
Торфяные почвы различаются по особенностям миграции микроэлементов: для торфяно-глеевой переходной почвы выявлено преобладание процессов аккумуляции микроэлементов в торфяной толще, по сравнению с нижележащей породой, тогда как для торфяно-глеевой низинной получены противоположные результаты. Выявлено обеднение торфяной толщи микроэлементами (кроме цинка и марганца).

Для миграции подвижных форм микроэлементов наблюдается общая закономерность. Выявлено интенсивное накопление подвижных форм практически всех исследованных микроэлементов в толще изученных почв. В органогенных горизонтах почв происходит их активная аккумуляция, вниз по профилю содержание подвижных микроэлементов резко снижается (рис. 3.2.4).

Лишь для меди выявлены отличные от других элементов закономерности: для почв подзолистого генезиса характерно обеднение ею, а для буроземов, подбуров и торфяно-глеевых почв – накопление данного элемента, но в значительно меньшей степени, чем остальных элементов.

*Ландшафт ледниковый холмисто-грядовый среднезаболоченный с преобладанием еловых местообитаний*

Радиальное распределение микроэлементов в почвах данного ландшафта значительно различается в зависимости от типа почвы. Все изучаемые почвы являются многобарьерными. В них выявлены следующие типы радиальных барьеров – органо-сорбционный, сорбционный, восстановительный глеевый. Для всех почв наблюдается наличие органо-сорбционных барьеров с накоплением большинства микроэлементов, особенно свинца, меди, марганца и цинка. Сорбционные барьеры характеризуются слабой мощностью, и в основном здесь концентрируются свинец, марганец, никель, хром и железо. Слабый восстановительный глеевый барьер формируется в торфяно-глеевых переходных почвах, для него характерна аккумуляция меди.

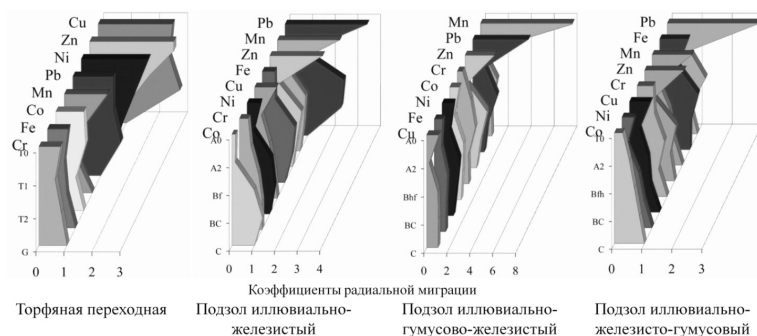


**Рис. 3.2.4.** Коэффициенты радиальной миграции содержания подвижных форм микроэлементов в почвах ландшафта денудационно-тектонического грядового

**Fig. 3.2.4.** Radial migration coefficients of labile trace elements in soils of a tectonic denudation ridge landscape

Относительно почвообразующих пород для почв данного типа ландшафта наблюдается вынос таких элементов, как медь, никель, кобальт, хром, железо, и накопление свинца, цинка и марганца. Только для торфяно-глеевой переходной почвы выявлено накопление всех микроэлементов.

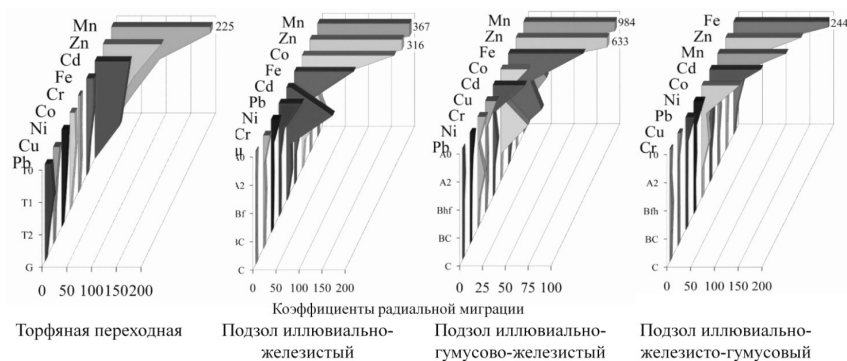
В почвах подзолистого генезиса распределение большинства микроэлементов в минеральной толще почв происходит по элювиально-иллювиальному типу, особенно это характерно для свинца, марганца, цинка и железа, в меньшей мере и для остальных микроэлементов (рис. 3.2.5). Выявлена интенсивная аккумуляция в лесных подстилках цинка, марганца, свинца, кобальта, в меньшей степени – остальных микроэлементов, исключение составляет хром. Торфяно-глеевым переходным почвам свойственна более равномерная радиальная миграция микроэлементов.



**Рис. 3.2.5.** Коэффициенты радиальной миграции общего содержания микроэлементов в почвах ландшафта ледникового холмисто-грядового

**Fig. 3.2.5.** Radial migration coefficients of total trace elements in soils of a tectonic denudation ridge landscape

Подвижные формы микроэлементов более контрастно распределены по горизонтам данных почв (рис. 3.2.6). Обнаружена активная биогенная аккумуляция в органогенных горизонтах подвижных форм марганца и цинка, а также железа и кобальта. В оторфованных подстилках иллювиально-железисто-гумусовых подзолов выявлена наиболее сильная биогенная аккумуляция железа и меньшая – марганца, цинка и кобальта. Таким образом, обнаружено, что по мере нарастания гидроморфности почв накопление подвижного железа увеличивается. В распределении подвижных форм микроэлементов в торфяной почве также наблюдаются отличающиеся тенденции по сравнению с миграцией их общего содержания – наибольшее количество марганца и цинка обнаруживается в самом верхнем плохо разложившемся слое торфа.



**Рис. 3.2.6.** Коэффициенты радиальной миграции содержания подвижных форм микроэлементов в почвах ландшафта озерных и озерно-ледниковых равнин

**Fig. 3.2.6.** Radial migration coefficients of labile trace elements in soils of a tectonic denudation ridge landscape

Таким образом, установлено, что процессы аккумуляции и выноса микроэлементов в профилях почв изучаемых ландшафтов различаются. Выявлено наличие следующих радиальных барьеров: органо-сорбционного, сорбционного и восстановительного глеевого. В почвах подзолистого типа наибольшее влияние на распределение микроэлементов оказывает биогенное накопление в лесной постилке и элювиально-иллювиальный тип миграции. Почвам буроземного типа почвообразования и элювиально-глеевым свойственно относительно равномерное распределение большинства микроэлементов по профилю.

Характер распределения подвижных форм изучаемых микроэлементов в почвенном профиле отличается большей контрастностью по сравнению с распределением их общего содержания. Обнаружена особенно интенсивная аккумуляция большинства их в органогенных горизонтах почв, в первую очередь это касается цинка и марганца. Вниз по профилю почвы концентрация микроэлементов в подвижной форме резко снижается, и минимальная ее величина отмечается в почвообразующих породах.

## **Глава 4. ПОЧВЕННЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСТОМУКШСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА**

### **Chapter 4. ECOLOGICAL MONITORING OF SOILS IN THE KOSTOMUKSHA ORE-DRESSING MILL IMPACT ZONE**

В нашей стране и за рубежом изучению воздействия аэротехногенных выбросов крупных промышленных предприятий на лесные биогеоценозы, в том числе на лесные почвы бореальной зоны, посвящено значительное число работ (Кашулина, 2002; Кашулина, Салтан, 2008; Лукина, Никонов, 1996; Лумме и др., 1997; Черненко, 2002; Adriano, 1996; Jones, 1991; Ruhling, Steiness, 1998; Tikkanen, Niemela, 1995).

Основная часть выбросов поллютантов в атмосферу (70,4 %) в Карелии приходится на промышленные центры республики, где сосредоточены крупные промышленные предприятия. Одним из наиболее крупных источников загрязнения атмосферы и почв в Карелии является Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ОАО «Карельский окатыш»), действующий с 1982 г. В состав его аэротехногенных поллютантов входят тяжелые металлы, составляющие 38 % объема их выбросов по республике в целом. Согласно «Государственному докладу о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия» (1999, 2000, 2008), приоритетными загрязнителями являются Fe, Ni, Cr, соединения серы, а также кальция и магния, которые оказывают различное влияние на свойства почв. При этом если соединения серы способствуют подкислению лесных почв, то щелочноземельные металлы (Ca, Mg), напротив, вызывают их подщелачивание.



#### **4.1. Влияние аэротехногенных поллютантов Костомукшского горно-обогатительного комбината на почвы прилегающей территории**

#### **4.1. Impact of air-borne industrial pollution from the Kostomuksha ore-dressing mill on adjacent soils**

Исследования на территории, прилегающей к Костомукшскому горно-обогатительному комбинату (ГОКу), были начаты в 1987 г. и проводились в несколько этапов. Объектами исследования являлись верхние органогенные горизонты подзолов иллювиально-гумусово-железистых связнопесчаных или супесчаных, сформировавшихся на морене в сосняках черничных 70–110-летнего возраста. Пробные площади расположены к северо-востоку и юго-западу от комбината на различном удалении (табл. 4.1.1).

**Таблица 4.1.1.** Расположение пробных площадей в районе Костомукшского ГОКа

**Table 4.1.1.** Locations of sample plots around the Kostomuksha ore-dressing mill

Направление и расстояние от ГОКа	Направление и расстояние от ГОКа
ЮЗ – 0,5 км	ЮЗ – 25 км
ЮЗ – 2 км	СВ – 0,5 км
ЮЗ – 5 км	СВ – 9 км
ЮЗ – 10 км	СВ – 12 км
ЮЗ – 15 км	Ю-ЮЗ – 50 км (фон)

В отобранных образцах лесных подстилок определяли кислотно-щелочные показатели, зольность, содержание элементов минерального питания, количество общего азота по общепринятым методикам (Агрохимические методы..., 1975) и валовое содержание тяжелых металлов методом атомной абсорбции. Полученные данные оценивали, сравнивая с условно чистыми почвами на расстоянии 50 км от комбината в Ю-ЮЗ направлении на территории заповедника «Костомукшский», с фоновыми показателями концентрации тяжелых металлов по Карелии (Федорец и др., 1999), а также с ПДК для тяжелых металлов в почве (Рэуце, Кырстя, 1986).

На основании проведенных исследований в разных районах лесной зоны и обработки литературных данных (Добровольский, 1999) была предложена шкала интенсивности загрязнения тяжелыми металлами гумусового горизонта почвы. Шкала построена с учетом возможности использования результатов определения металлов в почве как методом атомно-абсорбционной спектроскопии, так и другими методами (эмиссионная спектроскопия, нейтронно-активационный метод). Мерой интенсивности загрязнения служит коэффициент аномальности (или коэффициент концентрирования), равный отношению среднего значения концентрации металла в загрязненной почве к природной норме, т. е. геохимическому фону. При значении  $K_c$  от 5 до 10 загрязнение слабое, от 10,1 до 30 – умеренное, а при значении  $K_c$  более 30 – сильное.

Для оценки степени изменения содержания тяжелых металлов в лесных подстилках в районе действия комбината были вычислены коэффициенты концентрирования ( $K_c$ ) для каждого элемента:  $K_c = a/cф$ , где  $a$  – параметр на  $i$ -м км от источника,  $cф$  – параметр на фоновой территории. Таким образом, коэффициент концентрирования иллюстрирует изменения параметра по отношению к фону.

На *первом этапе* исследований, проведенном в районе Костомукшского ГОКа, было выявлено, что по истечении 5 лет работы комбината вокруг него сформировалась зона запыления поверхности почвы, простирающаяся до 5 (ЮЗ)–10 (СВ) км от источника. По прошествии еще трех лет протяженность зоны загрязнения не изменилась, однако возросла интенсивность накопления пыли. Предположительно в ближайшие 10–15 лет не произойдет трансформации лесных подстилок в органоминеральный субстрат даже в зоне максимального запыления. Здесь выражен нейтрализующий эффект оксидов металлов, поступающих с пылевыми выпадениями. Вблизи комбината на расстоянии 0,5–2 км снижены все виды почвенной кислотности. Другие лесорастительные характеристики остаются стабильными (содержание обменных оснований, подвижных форм фосфора и калия). По мере приближения к комбинату, начиная с 5 (ЮЗ) и 9 (СВ) км, возрастает общее содержание серы в лесных подстилках до 0,25–0,30 %. Среди металлов-загрязнителей почвы преобладает железо, количество которого в атмосферной пыли на три порядка выше

остальных металлов. К числу приоритетных загрязнителей были отнесены никель и хром, которые опережают другие металлы по интенсивности накопления. Однако абсолютные показатели концентрации металлов в почвах на порядок ниже ПДК и на данном этапе не представляли опасности ни для растений, ни для почвенной биоты (Лазарева и др., 1992).

*Второй этап* исследований проводился в 1997 г. на тех же пробных площадях, расположенных в радиусе 25 км в юго-западном и северо-восточном направлениях от комбината.

Как следует из литературных источников и проведенных нами исследований (Федорец, Бахмет, 2003; Федорец, Шильцова, 2001), индикаторными показателями деградации лесных подстилок под воздействием аэротехногенных выбросов промышленных предприятий служат, в первую очередь, кислотно-основные показатели и зольность. В связи с этим целью данного этапа исследований явилось изучение временной и пространственной динамики показателей зольности лесных подстилок, а также кислотно-щелочных свойств, содержания элементов минерального питания и концентрирования тяжелых металлов в почвах сосновых лесов в районе действия Костомукшского горно-обогатительного комбината по прошествии 15 лет с начала его функционирования.

**Таблица 4.1.2.** Кислотно-щелочные свойства лесных подстилок на пробных площадях на различном удалении от Костомукшского ГОКа

**Table 4.1.2.** Acid-base properties of forest litters in sample plots at different distances from the Kostomuksha ore-dressing mill

ПП	Направление и расст. от ГОКа, км	рН водн.	рН сол.	ГК	S	V, %
				мг-экв./100 г		
1	ЮЗ – 0,5	4,4	3,7	70,5	37,8	34,1
2	ЮЗ – 2	4,3	3,5	88,2	52,2	37,2
3	ЮЗ – 5	4,1	3,2	107,2	23,5	18,0
4	ЮЗ – 10	4,3	3,5	99,4	35,6	26,4
5	ЮЗ – 15	4,0	3,2	96,8	24,0	20,0
6	ЮЗ – 25	4,1	3,2	78,5	32,0	28,8
7	СВ – 0,5	5,0	4,4	57,1	49,5	47,1
8	СВ – 9	4,5	3,5	97,8	39,0	28,2
9	СВ – 12	4,2	3,3	109,9	27,6	20,6
Фон	Ю-ЮЗ – 50	3,4	3,1	67,0	25,0	26,3

Изменения кислотно-щелочных свойств почв по сравнению с почвами на территории фонового мониторинга выявлены на пробных площадях, расположенных как в юго-западном, так и в северо-восточном направлении от комбината (табл. 4.1.2). Вместо ожидаемого подкисления подстилок мы обнаруживаем снижение почвенной кислотности, определяемой по показателю pH, при этом, как и следовало ожидать, отмечено повышение степени насыщенности основаниями поглощающего комплекса лесных подстилок. Как было установлено ранее, в пылевых выбросах комбината содержатся щелочные и щелочноземельные металлы, нейтрализующие обменную почвенную кислотность.

**Таблица 4.1.3.** Содержание элементов питания и зольность лесных подстилок на различном удалении от Костомукшского ГОКа  
**Table 4.1.3.** Nutrient and ash contents of forest litters at different distances from the Kostomuksha ore-dressing mill

ПП	Направление и расст. от ГОКа, км	Зольность, %	N вал., %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/100 г	K <sub>2</sub> O, мг/100 г
1	ЮЗ – 0,5	36,6	0,91	36,2	124
2	ЮЗ – 2	19,5	1,05	36,9	118
3	ЮЗ – 5	12,0	1,0	39,3	125
4	ЮЗ – 10	12,0	1,12	53,2	154
5	ЮЗ – 15	13,1	0,97	61,4	124
6	ЮЗ – 25	17,9	0,74	35,1	146
7	СВ – 0,5	22,0	1,19	36,3	92
8	СВ – 9	30,2	0,80	35,6	106
9	СВ – 12	19,3	0,88	40,1	161
Фон	Ю-ЮЗ – 50	11,0	0,97	26,8	73,0

Зольность подстилок является показателем степени их минерализации. По этому показателю можно судить об уровне техногенного запыления поверхности почвенного покрова. К юго-западу и северо-востоку от комбината в радиусе 0,5–2 км зольность подстилок превышает фоновые показатели в 2–3 раза (табл. 4.1.3). Отмечается запыление подстилок и на других пробных площадях на протяжении всего градиента. Сравнивая показатели зольности подстилок в данное время с количественными показателями, полученными в первые годы работы комбината, установили, что на

юго-запад от комбината в радиусе 5 км запыленность подстилок возросла в 2–3 раза, в радиусе 23 км – в 1,5–2 раза; в северо-восточном направлении в радиусе 9 км – в 3 раза, а далее до 12 км – в 1,5 раза (Влияние..., 1992).

Количество валового азота в исследуемых почвах было типичным для подстилок иллювиально-гумусово-железистых песчаных подзолов в сосняках черничных северотаежной подзоны. Содержание подвижных соединений фосфора и калия довольно высокое, выше фоновых значений, причем зависимости от расстояния от источника загрязнения не выявлено. Таким образом, судя по содержанию элементов минерального питания в почвах, в районе действия источника аэротехногенного загрязнения снижения плодородия почв через 15 лет с начала работы комбината нами не выявлено.

**Таблица 4.1.4.** Содержание тяжелых металлов и железа в лесных подстилках на пробных площадях на различном удалении от Костомукшского ГОКа, мг/кг

**Table 4.1.4.** Heavy metal and iron content in forest litters in sample plots at different distances from the Kostomuksha ore-dressing mill, ppm

ПП	Направление, расст. от ГОКа	Cd	Pb	Ni	Co	Zn	Cr	Cu	Mn	Fe
1	ЮЗ – 0,5 км	0,71	21,1	19,1	3,0	62,3	16,0	9,2	497,4	10631
2	ЮЗ – 2 км	0,59	25,0	20,4	2,3	55,4	11,9	12,7	361,2	7818
3	ЮЗ – 5 км	0,57	18,3	10,1	1,5	44,5	8,0	10,0	170,3	8788
4	ЮЗ – 10 км	0,48	15,5	5,1	1,2	72,8	6,0	9,0	74,9	1864
5	ЮЗ – 15 км	0,46	20,2	4,0	1,0	50,0	7,5	6,6	53,6	2889
6	ЮЗ – 25 км	0,51	21,7	4,1	0,9	50,0	7,9	7,2	127,4	2343
7	СВ – 0,5 км	0,59	25,0	20,4	2,3	55,3	11,9	17,7	361,2	7818
8	СВ – 9 км	0,46	19,5	7,5	1,3	51,7	7,6	6,8	134,0	6910
9	СВ – 12 км	0,49	16,7	8,1	1,8	46,5	9,6	7,5	191,6	10281
	Среднее по Карелии, 1999 г.	0,54	26,6	7,2	2,0	83,0	10,0	63,4	403,1	2738
	Фон Ю-ЮЗ – 50 км	0,29	11,7	4,7	0,61	53,2	2,6	5,0	348	1038
	ПДК*	3,0	32	50	50	300	100	100	1500	Нет
	ОДК**	0,5	32	20	Нет	55	Нет	33	Нет	Нет

\* Рэуце, Кырстя, 1986.

\*\* Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве.

Песчаные подзолы северотаежной подзоны характеризуются низким содержанием всех металлов (Федорец и др., 2008). На первом этапе исследований (через 5 и 9 лет с начала функционирования комбината) выделена импактная зона загрязнения почв металлами в радиусе 6–8 км. Приоритетными загрязнителями по интенсивности накопления в лесных подстилках считаются железо, никель и хром (Лазарева и др., 1992).

Определение содержания тяжелых металлов в лесных подстилках подзолов через 15 лет с начала работы Костомукшского ГОКа позволило выявить особенности накопления каждого из них. Установлена пространственная изменчивость содержания тяжелых металлов в лесных подстилках подзолов в зависимости от расстояния от комбината (табл. 4.1.4). В радиусе 0,5–5 км вокруг источника выбросов накапливается кадмий выше средних показателей для Карелии. Следует отметить превышение фоновых значений по содержанию кадмия и свинца в 1,5–2 раза.

Наибольшие величины содержания кадмия отмечены в подстилках на расстоянии 0,5–2 км от комбината. В накоплении свинца связи с расстоянием от комбината в юго-западном направлении не выявлено, в то время как в северо-восточном наблюдается тенденция уменьшения его содержания при удалении от источника эмиссий. Нет также четкой зависимости накопления в подстилках в зависимости от расстояния от источника поллютантов таких элементов, как цинк и медь, а их содержание не достигает средних значений по региону, однако превышает фоновые концентрации. Что касается железа, то его содержание в подстилках высокое на всех пробных площадях, значительно выше, чем в среднем по республике, а также в почвах на расстоянии 50 км от источника аэротехногенных выбросов. Четко прослеживается зависимость накопления в лесных подстилках от расстояния от комбината кадмия, свинца, хрома, кобальта, никеля и марганца, содержание которых убывает по мере удаления от него как в юго-западном, так и в северо-восточном направлении, при этом превышая фоновые значения. Какой-либо закономерности накопления цинка в лесных подстилках в зависимости от расстояния от комбината не выявлено. Наибольшее накопление из всех определенных нами элементов установлено для железа на расстоянии 0,5 км в юго-западном на-

правлении. Однако количество всех указанных элементов в лесных подстилках не превышает ПДК для почв (Рэуце, Кырстя, 1986).

Были рассчитаны коэффициенты концентрации изучаемых тяжелых металлов и железа в лесных подстилках (табл. 4.1.5). Наиболее высокая степень концентрирования в лесных подстилках характерна для железа. В радиусе 0,5 км вокруг комбината количество его превысило фон в 10 раз, затем в юго-западном направлении интенсивность его накопления плавно падает, в то время как на северо-востоке остается очень высокой.

**Таблица 4.1.5.** Коэффициенты концентрирования (Kc) тяжелых металлов и железа в лесных подстилках в зоне действия Костомукшского ГОКа через 15 лет с начала его функционирования  
**Table 4.1.5.** Coefficients of concentration (Kc) of heavy metals and iron in forest litters in the Kostomuksha ore-dressing mill impact zone after 15 years of operation

ПП	Направление, расст. от ГОКа	Cd	Pb	Ni	Co	Zn	Cr	Cu	Mn	Fe
1	ЮЗ – 0,5 км	2,5	1,8	4,1	4,9	1,2	6,2	1,8	1,4	10,2
2	ЮЗ – 2 км	2,0	2,1	4,3	3,7	1,0	4,6	2,5	1,0	7,5
3	ЮЗ – 5 км	1,9	1,6	2,1	2,5	0,8	3,1	2,0	1,0	8,5
4	ЮЗ – 10 км	1,7	1,4	1,1	1,8	1,1	2,3	1,9	1,1	1,8
5	ЮЗ – 15 км	1,7	1,7	1,0	1,6	1,0	2,9	1,3	1,0	2,8
6	ЮЗ – 25 км	1,8	1,9	0,9	1,5	1,0	3,0	1,7	1,0	2,2
7	СВ – 0,5 км	2,0	2,1	4,3	3,8	1	4,5	3,5	1,0	7,5
8	СВ – 9 км	1,6	1,7	1,6	2,1	1	2,9	1,4	0,4	6,7
9	СВ – 12 км	1,7	1,4	1,7	2,9	1	3,7	1,5	0,6	9,9

Таким образом, руководствуясь градациями загрязнения, предложенными В. В. Добровольским (1999), выявили, что через 15 лет с начала работы комбината на ЮЗ до 5, а на СВ до 12 км сформировалась зона слабого загрязнения почв железом и хромом.

Следующим металлом по интенсивности накопления в лесных подстилках является хром, количество которого превысило фон в 6,2 раза. Довольно интенсивно накапливается кобальт, а затем – никель. Значительно менее активно происходит аэротехногенное накопление меди, кадмия, свинца, марганца, причем примерно одинаково в различных направлениях от комбината. Загрязнения лесных подстилок цинком практически не выявлено. Таким образом, вокруг

комбината образуется зона с наибольшим загрязнением тяжелыми металлами лесных подстилок в радиусе 5 (ЮЗ)–9 (СВ) км. По величине коэффициента концентрирования тяжелые металлы образуют следующий ряд:  $Fe > Cr > Co > Ni > Cu > Cd > Mn > Pb > Zn$ .

Сравнивая данные, полученные в настоящее время, с материалами десятилетней давности, отмечаем, что радиус зоны интенсивного загрязнения лесных подстилок практически не изменился, однако наблюдается иной ряд приоритетных загрязнителей. На первом месте осталось железо, на втором месте оказался хром, за ним – кобальт, а никель переместился на четвертое место. Следует отметить, что цинк в настоящее время занимает последнее место по интенсивности накопления в лесных подстилках пробных площадей, расположенных в юго-западном направлении от комбината, в то время как по направлению СВ отмечено увеличение его концентрирования.

Таким образом, второй этап исследования содержания тяжелых металлов в лесных подстилках позволил выявить особенности накопления различных металлов. Была установлена четкая зависимость накопления в лесных подстилках от расстояния от комбината таких элементов, как хром, кобальт, никель, марганец и железо, концентрация которых превышала средние значения для Карелии в целом. Однако содержание ни одного из определенных элементов не выходило за пределы величины ПДК.

Целью *третьего этапа* исследований явилась оценка загрязнения лесных почв по прошествии 27 лет с начала работы комбината и через 12 лет после последнего обследования.

Исследования проводили градиентным методом: пробные площади (ПП) расположены в юго-западном направлении от комбината на различном от него удалении (0,5; 2; 5; 10; 15 км). Как и при проведении предыдущих туров обследования, пробные площади располагались в сосняках воронично-черничных. Контролем служила пробная площадь на полигоне мониторинга, расположенная на территории заповедника «Костомукшский» на расстоянии 50 км от Костомукшского ГОКа в Ю-ЮЗ направлении. Определяли агрохимические показатели, зольность подстилок и валовое содержание тяжелых металлов и железа.

Как показали исследования, лесные подстилки почв в сосняках воронично-черничных северотаежной подзоны, находящиеся в есте-



ственных природных условиях, без непосредственного антропогенного влияния характеризуются высокими показателями обменной кислотности – pH 3,0–3,2. В районе воздействия аэротехногенных поллютантов, в состав которых входит сера, предполагалось увеличение почвенной кислотности, однако этого не происходит. Наименьшие показатели обменной кислотности лесных подстилок (pH 4–4,5) выявлены на расстоянии 0,5–2 км от источника загрязнения (табл. 4.1.6), т. е. ожидаемого подкисления мы не обнаруживаем, что связано с нейтрализующим действием щелочных и щелочноземельных металлов, входящих в состав выбросов. Эта зависимость подтверждается более высокими показателями суммы обменных оснований (S) в лесных подстилках почв на данных пробных площадях. Показатели pH KCl лесных подстилок, определенные нами во втором туре обследования, были ниже и составляли 3,2–3,5, т. е. кислотность продолжает в настоящее время снижаться.

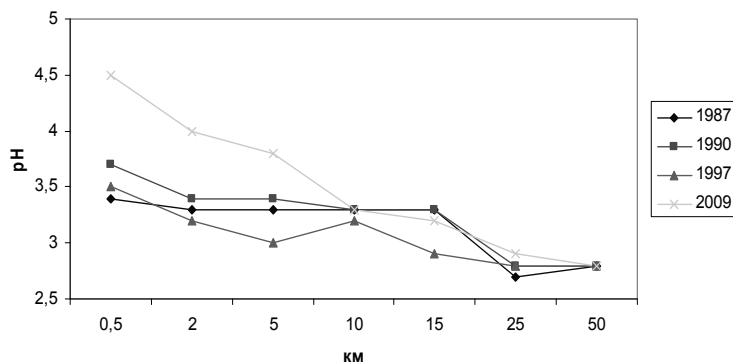
**Таблица 4.1.6.** Агрохимические показатели почв градиента в районе Костомукшского ГОКа (2009 г.)

**Table 4.1.6.** Agrochemical parameters of soils at different distances from the Kostomuksha ore-dressing mill (2009)

Расстояние от ГОКа на ЮЗ, км	Горизонт, см	pH KCl	S, мг-экв./100 г	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/100 г	C, %
0,5	A0 0–6	4,5	34,6	65,7	29,1
2,0	A0 0–7	3,9	25,1	59,9	27,6
5,0	A0 0–5	3,3	22,2	45,6	36,0
10,0	A0 0–3	3,8	24,0	67,3	39,5
15,0	A0 0–4	3,2	15,3	41,6	40,8
50 (контроль)	A0 0–5	2,7	35,9	22,5	46,0

Проведенные многолетние исследования позволили установить временные тренды показателей почвенной кислотности. Изменения кислотно-щелочных показателей почв по сравнению с почвами на территории фонового мониторинга выявлены на всех пробных площадях до 15 км от комбината. Наименьшая величина обменной кислотности лесных подстилок через 27 лет с начала работы комбината, составляющая по показателю pH 4–4,5, определена на расстоянии 0,5–2 км от источника загрязнения. Прогрессирующее во времени уменьшение кислотности лесных подстилок иссле-

дуремых почв выявлено на расстоянии до 5 км от источника загрязнения. На расстоянии 10–15 км сохраняются стабильные значения рН, установившиеся через 5 лет с начала функционирования Костомукшского горно-обогатительного комбината (рис. 4.1.1).



**Рис. 4.1.1.** Временная и пространственная изменчивость показателя рН в лесных подстилках

**Fig. 4.1.1.** Temporal and spatial variation of pH value in forest litters

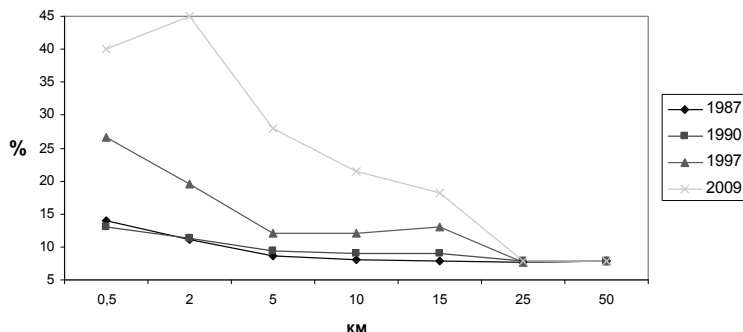
Определение содержания органического вещества в лесных подстилках показало, что количество углерода на расстоянии до 2 км от комбината ниже, чем в почвах фоновых участков, что связано с увеличением в них минеральных примесей, вероятно, пыли.

Зольность подстилок является показателем степени их минерализованности. По этому показателю можно судить об уровне техногенного запыления поверхности почвенного покрова. Проведенные ранее исследования показали повышение зольности лесных подстилок, особенно в радиусе 0,5–2,0 км, где она возросла в 2–3 раза, а с удалением на 15 км была близка к контролю.

Проведенные исследования свидетельствуют о прогрессирующем возрастании зольности подстилок, а значит, ее запыления. На расстоянии 0,5 км зольность превышает контроль (фон), находящийся на расстоянии 50 км от комбината, уже почти в 4 раза; на расстоянии до 10 км – в 2,0–2,5 раза.

По сравнению со вторым туром обследования степень запыления подстилок увеличилась в 2,0–2,5 раза на расстоянии 2–5 км от

источника запыления, причем радиус воздействия на показатель зольности возрастает. При удалении от комбината на 15 км зольность подстилок снижается (рис. 4.1.2).



**Рис. 4.1.2.** Временная и пространственная изменчивость зольности лесных подстилок в районе влияния аэротехногенных выбросов комбината

**Fig. 4.1.2.** Temporal and spatial variation of the ash content in forest litters in the impact zone of air-borne industrial emissions from the Kostomuksha ore-dressing mill

Исследование уровня накопления тяжелых металлов и железа в песчаных подзолах иллювиально-гумусово-железистых провели через 27 лет с начала работы комбината и, соответственно, через 12 лет после предыдущего тура обследования. Установили, что на расстоянии до 2 км от комбината повышено содержание в лесных подстилках кадмия, свинца, меди, цинка и марганца, количество которых при удалении от источника загрязнения снижается.

Наибольшее накопление никеля выявлено в почвах пробной площади, находящейся на расстоянии 0,5 км от источника выбросов. Для хрома не установлено четких закономерностей пространственного распределения в изучаемых почвах, лишь отмечена тенденция его накопления в лесных подстилках по сравнению с региональным фоновым содержанием. Содержание кобальта в лесных подстилках выше фона на всем протяжении градиента, но особенно много его накапливается на расстоянии 5–15 км от промышленного предприятия (табл. 4.1.7).

**Таблица 4.1.7.** Валовое содержание тяжелых металлов и железа в подстилках градиента в районе Костомукшского ГОКа в 2009 г., мг/кг  
**Table 4.1.7.** Bulk heavy metal and iron content in forest litters at different distances from the Kostomuksha ore-dressing mill in 2009, ppm

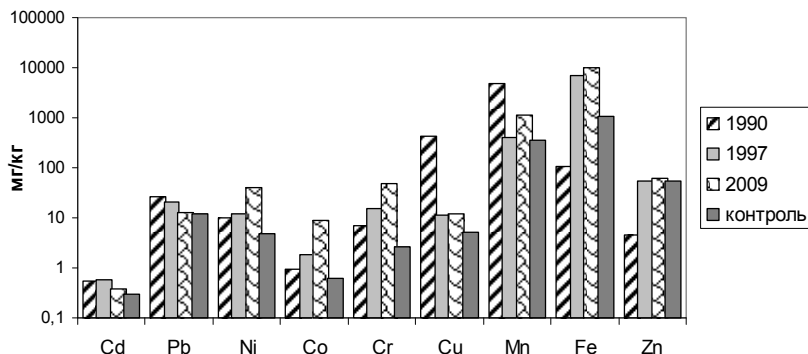
Расстояние от ГОКа, км	Горизонт, см	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	Fe
0,5	A0 0–6	0,51	19,20	14,6	64,4	80,0	4,14	39,7	1910	11 800
2,0	A0 0–7	0,63	11,4	22,0	70,2	19,3	4,77	66,5	1430	9310
5,0	A0 0–5	0,21	5,77	8,75	32,1	54,9	10,8	74,0	1030	10 000
10,0	A0 0–3	0,23	6,40	5,96	19,4	35,1	7,63	35,9	798	9570
15,0	A0 0–4	0,32	7,79	7,72	24,0	16,8	7,45	23,0	644	9460
ПДК		3,0	32,0	100	300	50	50	100	1500	–
Региональный фон для подстилок*		0,50	22,7	11,3	63,2	13,6	3,0	13,8	1465	6817
Фон мониторинг Ю-ЮЗ – 50 км		0,29	11,7	5	53,2	4,7	0,61	2,6	348	1038

\* Федорец и др., 2008.

Высокие показатели содержания железа в органогенных горизонтах отмечены на всех исследуемых площадях. Сравнивая данные концентрации с фоновыми показателями, выявили, что выше фона на всем протяжении градиентной полосы в подстилках накапливаются никель, кобальт, хром и железо, а также марганец.

Таким образом, определение содержания тяжелых металлов в лесных подстилках, проведенное через 27 лет с начала функционирования комбината, показало, что продолжается загрязнение лесных почв тяжелыми металлами. По сравнению с предыдущим туром обследования на всех пробных площадях, расположенных на различном удалении от эмитента, значительно увеличилось содержание в лесных подстилках почти всех металлов, в первую очередь никеля, кобальта, железа и хрома, в то же время отмечено снижение накопления кадмия и свинца и в некоторой степени цинка. При этом превышение ПДК выявлено лишь для никеля и составило 1,6 ПДК. Следует отметить, что продолжается накопление в лесных подстилках умеренно и слабоопасных загрязнителей (Co, Ni, Cu, Cr, Mn) и в то же время снижается накопление Cd, Pb и Zn, относящихся к сильноопасным. Относительно железа класс опасности не установлен (Водяницкий, 2012). Таким образом, в почвах в районе Костомукшского ГОКа накапливаются, в основном, умеренно опасные элементы.

Изучение временной изменчивости содержания металлов в лесных подстилках сосняков по усредненным показателям в зоне 15 км по градиенту (рис. 4.1.3) свидетельствует о прогрессирующем загрязнении подстилок следующими металлами: никелем, кобальтом, хромом, а также железом, которые можно отнести к приоритетным загрязнителям.



**Рис. 4.1.3.** Временная изменчивость содержания металлов в лесных подстилках в 15-км зоне в районе Костомукшского ГОКа

**Fig. 4.1.3.** Temporal variation of heavy metal content in forest litters within 15 km from the Kostomuksha ore-dressing mill

Оценку степени изменения содержания тяжелых металлов в лесных подстилках в результате воздействия выбросов комбината провели по показателю Кс (коэффициент концентрирования) для каждого элемента (табл. 4.1.8). Коэффициент концентрирования иллюстрирует изменение параметра по отношению к фону (контрольному участку). При анализе массива Кс выявлена общая тенденция увеличения содержания металлов в лесных подстилках в зоне запыления. Это свидетельствует о том, что техногенная пыль – основной источник металлов. Исследования 1997 и 2009 гг. показали различную степень концентрирования одних и тех же металлов в различные периоды наблюдений, т. е. изменился ряд приоритетных загрязнителей. Если в 1997 г. концентрирование кадмия, свинца и железа отмечается в подстилках всего градиента, то в 2009 – по всему градиенту концентри-

руются никель, кобальт, хром и железо. Эти металлы были выявлены как приоритетные загрязнители и в первые туры обследований (Лазарева и др., 1992). В последние годы накопления свинца практически не происходит, а кадмий концентрируется на расстоянии около 2 км от источника аэротехногенного загрязнения почвы. Следует отметить, что цинк в настоящее время занимает последнее место по интенсивности накопления, т. е. практически исключается из числа загрязнителей. Однако концентрация ни одного из указанных элементов не превысила предельно допустимых концентраций (Рэуце, Кырстя, 1986).

**Таблица 4.1.8.** Коэффициенты концентрации (Kc) тяжелых металлов в лесных подстилках пробных площадей на различном удалении от эмитента (Костомукшского ГОКа) через 27 лет с начала работы комбината, 2009 г.

**Table 4.1.8.** Coefficients of concentration (Kc) of heavy metals in forest litters in sample plots at different distances from the Kostomuksha ore-dressing mill after 27 years of operation

ПП	Направление, расст. от ГОКа	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	Fe
1	ЮЗ – 0,5 км	1,8	1,6	3,0	1,2	17,0	23,1	15,3	5,5	11,4
2	ЮЗ – 2 км	2,2	1,0	4,4	1,3	4,1	7,9	25,5	4,1	11,4
3	ЮЗ – 5 км	1,0	1,0	1,8	1,2	11,6	17,7	28,5	3,0	9,6
4	ЮЗ – 10 км	1,0	1,0	1,2	1,0	7,5	12,5	13,8	2,3	9,2
5	ЮЗ – 15 км	1,1	1,0	1,5	1,0	3,6	12,3	8,9	1,9	9,1

Руководствуясь шкалой В. В. Добровольского (1999), установили, что на расстоянии 10 км сформировалась зона слабого загрязнения почв никелем и железом, а до 15 км – умеренного загрязнения кобальтом и хромом.

Многими исследователями выявлено, что в зонах локального загрязнения общее содержание микроэлементов может повыситься на несколько порядков. Так, по данным С. И. Решетникова (1990), в окрестностях Среднеуральского медеплавильного завода содержание меди возросло в 19 раз по сравнению с незагрязненной почвой. В районе Дальнегорского завода цветной металлургии в течение 25 лет в почвах общее содержание свинца увеличилось почти в 100 раз, цинка – в 10 раз (Елпатьевский, Луценко, 1982). В районах аэротехногенных воздействий

комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» содержание в почвах никеля и меди возросло на несколько порядков (Переверзов и др., 2002).

Почвы являются депонирующими средами, накапливающими многолетние загрязнения. Оценка состояния данных сред производилась нами и по значениям суммарных показателей загрязнения ( $Z_c$ ). Как было уже сказано, техногенные аномалии чаще всего имеют полиэлементный характер, в этой связи рассчитали суммарный показатель загрязнения тяжелыми металлами лесных подстилок. Для урбанизированных территорий разработаны градации уровня загрязнения в зависимости от коэффициента  $Z_c$ . Они учитывают показатели состояния здоровья населения, проживающего на территории с различным уровнем загрязнения. Если величина  $Z_c$  не превышает 16, то уровень загрязнения считается минимальным, если составляет от 17 до 32, то уровень загрязнения средний, при показателях от 33 до 128 – высокий, а более 128 – максимальный (Методические рекомендации..., 1982). По мере удаления от комбината показатели суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами снижаются (табл. 4.1.9).

**Таблица 4.1.9.** Показатели суммарного загрязнения лесных подстилок в районе Костомукшского ГОКа

**Table 4.1.9.** Integrated pollution index  $Z_c$  of forest litters around the Kostomuksha ore-dressing mill

ПП	1	2	3	4	5	6
Расст. от ГОКа, км	0,5	2	5	10	15	25
1997 г.	28,1	20,8	15,9	6,2	7,0	6,9
2009 г.	71,9	52,9	67,4	41,5	32,4	19,0

В работе М. А. Хованской (2012) приводятся данные по соответствию показателя  $Z_c$  геохимическим баллам, разработанным автором для почв горнодобывающих районов (табл. 4.1.10).

**Таблица 4.1.10.** Показатели  $Z_c$  и геохимические баллы (Хованская, 2012)

**Table 4.1.10.**  $Z_c$  values and geochemical scores (Hovanskaya, 2012)

Геохимический балл	$N = 0$	$0 < N < 1$	$1 \leq N < 2$	$2 \leq N < 3$	$3 \leq N < 4$	$N = 4$
$Z_c$	$< 8$	8–16	16–32	32–64	64–128	$> 128$

Все показатели  $Z_c$ , рассчитанные для лесных подстилок в районе действия Костомукшского комбината, в 1997 г. были значительно ниже, чем полученные в 2009, т. е. подтверждается вывод о прогрессирующем с течением времени загрязнении лесных подстилок. Последний тур обследования (2009 г.) показал, что на расстоянии около 10 км от комбината суммарное загрязнение соответствует 2–3 эколого-геохимическим баллам, а на расстоянии 15–25 км – 1–2 баллам (табл. 4.1.9). Однако следует отметить, что проблема оценки уровня техногенного загрязнения почв в районах промышленных воздействий в настоящее время недостаточно разработана, и на ней следует в дальнейшем сконцентрировать внимание почвоведов и экологов.

Таким образом, за прошедшие годы процесс загрязнения лесных подстилок продолжился, о чем свидетельствует возрастание в них количества меди, никеля, кобальта, хрома, марганца. В то же время снизилось накопление свинца, а кадмия, цинка и железа осталось на прежнем уровне. В целом содержание всех микроэлементов в лесных подстилках исследованных почв ниже ПДК, превышение выявлено лишь для никеля.

## **4.2. Микробиологическая диагностика почв, находящихся в условиях промышленного загрязнения**

### **4.2. Microbiological diagnosis of soils exposed to industrial pollution**

Структурно-функциональная перестройка микробиоценоза почв, находящихся в условиях аэротехногенного загрязнения, хорошо диагностируется изменением численности и состава бактерий группы сапротрофов, бактерий-олиготрофов, таксономического разнообразия микроскопических грибов. В качестве индикатора состояния почв хорошо зарекомендовали себя целлюлозоразрушающие микроорганизмы, перестройка структуры и функциональной активности которых возможна на фоне аэротехногенного загрязнения. Структурные изменения микробиоценоза оказывают влияние на функциональную активность микроорганизмов, которая выражается изменением работы ферментов. Сенситивность и экспрессивность биохимических параметров также позволяет их



использовать при комплексной оценке состояния почв – главной составляющей антропогенно нарушенных экосистем (Громов, 1989; Евдокимова, 1994; Звягинцев, 1987).

Микробиологический мониторинг почв в районе Костомукшского месторождения проводился регулярно с 1987 г., последний этап – в 2009 г. Результаты работы были отражены в ряде публикаций (Медведева, Бахмет, 2001; Медведева и др., 2003). Объектом исследования явились микробные сообщества органогенного (лесная подстилка) и минерального (подзолистый) горизонтов почв сосняков, которые расположены в автономных позициях ландшафта по градиенту аэротехногенного загрязнения выбросов предприятия. Изучение динамики изменения микробиально-биохимических свойств почв, находящихся в условиях аэротехногенного загрязнения, предполагает, прежде всего, анализ химических свойств почв как среды обитания микроорганизмов. Характеристики пробных площадей и свойства почв приводятся в главе 3.1.

Отбор почв для микробиально-биохимических анализов был произведен по верхним генетическим горизонтам на стенке разреза из пяти точек. Численность почвенных гетеротрофных микроорганизмов, которые принимают участие в трансформации азот- и углеродсодержащих соединений, определяли методом посева на плотные селективные питательные среды по методике (Методы..., 1991). При этом количество бактерий, использующих органические формы азота, учитывали на мясопептонном агаре (МПА), ассимилирующие минеральный азот – на крахмало-аммиачном агаре (КАА), олигонитрофилы – на среде Эшби, олиготрофные микроорганизмы – на почвенном агаре (ПА). Численность актиномицетов определяли на КАА. Комплекс целлюлозоразрушающих микроорганизмов (КЦМ) изучался на среде Гетчинсона. Микроскопические грибы подсчитывали на сусло-агаре (СА). Определение видового состава микробного ценоза почв проводили молекулярным методом ГХ-МС (Osipov, Turova, 1997).

Коэффициент микробиологической минерализации и иммобилизации, рассчитанный как отношение бактерий, утилизирующих минеральные формы азота, к численности микроорганизмов, потребляющих органический азот (КАА/МПА), использовали для оценки морфофункциональной структуры микробоценоза и направленности трансформации органического вещества (Методы..., 1991).

Почвенные микроорганизмы, функционирующие в различных горизонтах почв, имеют различную экологическую стратегию выживания, поэтому и реакция их на антропогенные воздействия может отличаться. Прежде всего, выявили, что для всех исследуемых почв прослеживается четкая дифференциация микробиологического профиля на органогенный горизонт (лесная подстилка) и минеральный подзолистый (A2) (табл. 4.2.1). В целом характер изменения численности микроорганизмов в различных горизонтах почв хорошо отражает распределение органического вещества по профилю: в органогенном горизонте численность микроорганизмов выше по сравнению с нижележащим минеральным горизонтом.

**Таблица 4.2.1.** Структура микробоценоза почв, расположенных на разном расстоянии от Костомукшского ГОКа, КОЕ тыс./г почвы  
**Table 4.2.1.** Structure of the microbial community in soils at different distances from the Kostomuksha ore-dressing mill, 1000 CFU/g of soil

Гор- зон- т	Бактерии						Мик- роми- цеты	КЦМ	КАА МПА	ПА МПА	ПА КАА
	усваивающие органические формы азота		усваивающие минеральные формы азота		олиго- нитро- филы	олиго- трофы (ПА)					
общее	спо- ровые	общее	актино- мицеты								
0,5 км											
A0	1648	1334	940	103	3440	597	320	6	0,6	0,4	0,6
A2	302	57	180	3	141	25	4	5	0,6	0,1	0,1
1 км											
A0	1523	1344	2143	192	3615	1061	441	22	1,4	0,7	0,5
A2	111	47	127	Не обн.	180	28	28	6	1,1	0,3	0,2
2 км											
A0	2426	792	3830	68	8492	1010	262	7	1,6	0,4	0,3
A2	115	35	171	Не обн.	258	30	7	6	1,5	0,3	0,2
5 км											
A0	1049	347	1266	126	5739	498	141	11	1,2	0,5	0,4
A2	165	55	117	Не обн.	209	31	6	4	0,7	0,2	0,3
15 км											
A0	532	73	981	Не обн.	9406	474	204	19	1,8	0,9	0,5
A2	80	16	157	Не обн.	134	34	4	2	2,0	0,4	0,2
25 км											
A0	687	150	1533	Не обн.	2754	605	163	20	2,2	0,9	0,4
A2	193	79	116	Не обн.	295	35	9	5	0,6	0,2	0,3

Для микробоценоза изучаемых почв характерна олиготрофность в отношении субстрата, которая обусловлена неглубокой минерализацией органического вещества, недостаточным поступлением солнечной энергии в экосистему, низким содержанием щелочных и щелочноземельных металлов в почвообразующей породе, а также химическим составом растительного опада, поступающего на почву (Морозова, 1991). Среди аммонификаторов доминируют неспорообразующие бактерии, которые осуществляют неглубокую минерализацию органического вещества. Велика роль микроскопических грибов, экзаметаболиты которых расщепляют трудногидролизуемые органические соединения. Последствия могут быть предшественниками гумусовых соединений, аккумулирующихся в почве.

Несмотря на то что общий план строения микробоценоза антропогенно нарушенных почв сохранялся, присутствовали все наиболее значимые эколого-трофические группы микроорганизмов, на фоне аэротехногенного загрязнения происходили заметные изменения в микробном сообществе. На участках, расположенных на расстоянии 5 км от ГОКа, прослеживался олигодинамический эффект аэрополлютантов на микробоценоз почв. Прежде всего, отмечали возрастание численности бактерий, утилизирующих органические соединения азота. На участках, расположенных недалеко от ГОКа (до 1 км), лидирующее положение в группе аммонификаторов органогенного горизонта почв сохраняли спорообразующие бактерии (до 88 %). Как известно, бактерии данной группы способны синтезировать внеклеточные аминокислоты, используемые для биоконструктивных целей микробиотой, участвовать на более поздних стадиях превращения органического вещества в почве (Смиронов и др., 1992; Yamauch, Odani, 1996). Стимулирующее воздействие аэрополлютанты оказывали на бактерии, ассимилирующие минеральные соединения азота, численность которых увеличивалась; при этом наибольшее влияние аэротехногенного загрязнения на данную эколого-трофическую группу было отмечено на участке, расположенном на расстоянии 2 км от ГОКа. Необходимо подчеркнуть, что в ненарушенных почвах сосновых биогеоценозов актиномицеты встречаются эпизодически.

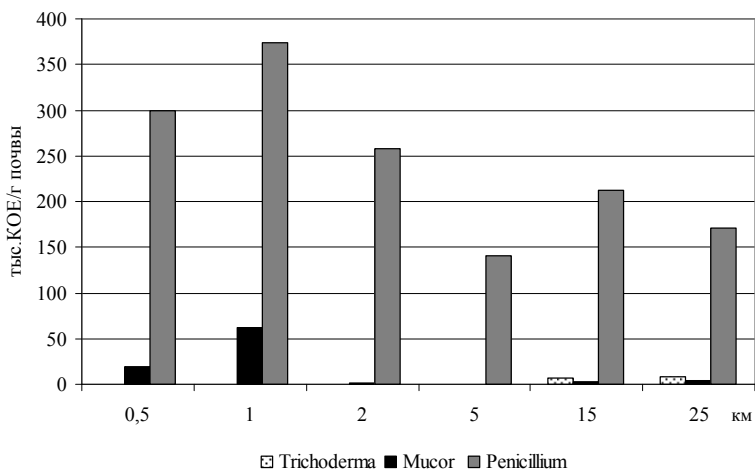
Появление мицелиальных прокариотов в блоке гидролитиков свидетельствует о присутствии в достаточном количестве для них элементов минерального питания, благоприятных условиях для их развития. Актиномицеты осуществляют более глубокую минерализацию органического вещества, что способствует последующей аккумуляции промежуточных метаболитов в почвенной толще на данном участке. Можно предположить, что все это предотвращает конкуренцию растений за минеральные соединения азота, активно ассимилируемые актиномицетами (Зенова, 2013).

Бактерии-олигонитрофилы сохраняли высокую численность в почвах фактически на всех участках. Исключение составлял участок, расположенный на расстоянии 0,5 км от предприятия, где происходило снижение их численности. Устойчивым блоком в микробном сообществе к изменению в педосфере были бактерии-олиготрофы. Это свидетельствовало об относительной стабильности собственно гумусовых веществ почвы, несмотря на продолжительный антропогенный пресс. Индекс педотрофности (ПА/КАА) в органогенном горизонте почв составлял в среднем 0,5, что косвенно свидетельствует о низкой степени вовлечения в круговорот гумуса почвы и подтверждает недоступность питательных веществ микроорганизмам, а значит, и низкую ассимиляцию элементов минерального питания из запасов гумуса.

В комплексе гидролитиков важное место, как известно, занимают микроскопические грибы. Микологический анализ показал, что на всех участках в почвах присутствуют представители р. *Penicillium*, *Mucor*. Среди них доминировали пенициллы, которые благодаря своим генетическим особенностям достаточно устойчивы к аэротехногенному загрязнению. Представители рода *Trichoderma* были отмечены в почвах, расположенных на относительно чистых территориях (рис. 4.2.1). Таким образом, полученные данные микологических и биохимических исследований свидетельствуют о тенденции упрощения трофической структуры микромицетов на фоне антропогенного пресса.

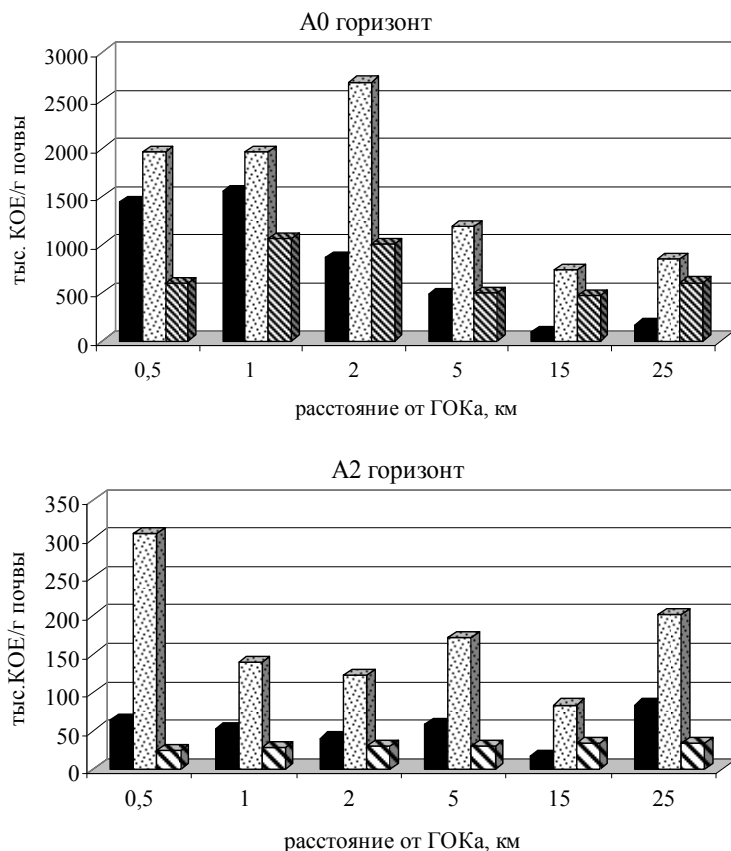
Важную информацию о состоянии микробного сообщества может дать изучение комплекса целлюлозоразрушающих микроорганизмов (КЦМ). Как показали исследования на участках, наиболее удаленных от источника эмиссии поллютантов, их числен-

ность и целлюлозолитическая способность были низкие. В составе аэробных гетеротрофных целлюлозоразрушителей доминировали микроскопические грибы, очень медленно осваивающие целлюлозный фильтр и выделяющие внеклеточные целлюлазы, разрушающие полимер. Биодеструктивная деятельность микромицетов была достаточно низкая из-за низкого содержания в почвах макро- и микроэлементов, необходимых для более полного проявления их целлюлозолитической способности. На участках, близко расположенных к ГОКу и испытывающих наибольшее воздействие поллютантов, численность аэробных целлюлолитиков была ниже по сравнению с контролем. Однако снижение их численности происходило в результате перестройки микробного сообщества целлюлолитиков: преобладающей группой были миксобактерии, эпизодически также были отмечены мицелиальные прокариоты. Появление миксобактерий в КЦМ резко усиливало целлюлозолитическую способность микробиоты, как следствие ускорение круговорота элементов-биогенов, возвращение их в природную миграцию.



**Рис. 4.2.1.** Таксономический состав микроскопических грибов в А0 почв градиента загрязнения

**Fig. 4.2.1.** Taxonomic composition of microscopic fungi in the A0 horizon of soils along the contamination gradient



**Рис. 4.2.2.** Структура микробоценоза органогенного горизонта почв градиента загрязнения:

1 – гидролитики: сумма спороносных форм, актиномицетов, комплекса целлюлозоразрушающих микроорганизмов; 2 – копиотрофы: сумма бактерий МПА, микромицетов на СА, бактерий на КАА; 3 – олиготрофы: бактерии ПА

**Fig. 4.2.2.** Structure of the microbial community in the organic horizon of soils along the contamination gradient:

1 – hydrolytic group: sum of spore-bearing forms, actinomycetes, cellulose-decomposing microorganisms; 2 – copiotrophic group: sum of bacteria on meat-peptide agar, microfungi on wort agar, bacteria on starch-ammonia medium; 3 – oligotrophic group: bacteria on soil-extract agar

Распределение суммарного количества микроорганизмов изучаемых эколого-трофических групп в почве на каждой пробной площади было различным во все годы наблюдений (рис. 4.2.2). Вместе с тем на участках, расположенных на расстоянии 2 км от промышленного предприятия, отмечали тенденцию более высоких показателей численности бактерий сапротрофов и олигонитрофилов. Это подтверждает, что микробное сообщество, участвующее в минерализации азот- и углеродсодержащих соединений в почве, обеспечивает оптимальную работу микроорганизмов-деструкторов, взаимосвязанность и стабильность трофических связей между различными эколого-трофическими группами в микробном сообществе.

Необходимо отметить, что если в отношении химических свойств почв антропогенно нарушенных экосистем (накопление технопыли, изменение кислотности, элементного состава) прогнозировать изменения возможно, то в отношении микроорганизмов и их функциональной активности прогнозы делать достаточно сложно. Это во многом обусловлено особенностями почвенных микроорганизмов, адаптационный потенциал которых к любому виду антропогенного воздействия достаточно высокий. Чувствительность, пластичность, способность быстро приспосабливаться к условиям агрессивной среды за счет элиминирования отдельных групп и таксонов позволяет им длительно существовать и участвовать в важнейших процессах почвообразования. При этом реакция микробоценоза почв, испытывающих длительный антропогенный пресс, может быть менее выраженной по сравнению с вновь вовлекаемыми в техногенез микробными сообществами. Перегруппировка последних сопряжена с использованием дополнительных энергетических эквивалентов для целей конструктивного метаболизма, формирования защитных качеств микроорганизмов.

Ферментативная активность почв является одним из показателей жизнедеятельности микробиоты (Гузов, Левин, 1991). В условиях аэротехногенного загрязнения ферментативная активность почв может увеличиваться или уменьшаться вследствие нарушения адсорбции ферментов почвенными частицами (Подкопаева и др., 2003). При этом может происходить изменение физико-химических свойств ферментов, гидролитических и трансферазных свойств, оптимума их работы. Вследствие этого возможно измене-

ние их активности, обусловленное нарушением зарядовых взаимодействий в реакциях комплексообразования фермента и субстрата. Кроме того, пыль, оседаемая на почвы, способна образовывать корку на ее поверхности, тем самым изменять газовый режим в микропорах. Можно предположить, что сорбция минеральных частиц ферментами защищает их поверхность, делает недоступными для разрушительного воздействия микроорганизмов.



**Рис. 4.2.3.** Ферментативная активность почв, расположенных в зоне Костомукшского ГОКа

**Fig. 4.2.3.** Enzymatic activity of soils in the zone exposed to the impact of the Kostomuksha ore-dressing mill



Как известно, распад органических соединений сопровождается образованием токсичной для микроорганизмов перекиси, нейтрализация вредного воздействия которой происходит при участии каталазы. Результаты показали, что в почвах, близко расположенных к ГОКу, активность каталазы была выше по сравнению с контролем (рис. 4.2.3). Это свидетельствует о более высокой скорости минерализационных процессов, происходящих в почве.

Усиление катаболизма азотсодержащих органических соединений в почвах, подверженных влиянию промпредприятия, приводит к увеличению активности уреазы. Являясь ферментом строго специфического действия, она осуществляет гидролитическое расщепление мочевины до  $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$ . Данные простые соединения могут активно включаться в общие метаболические цепи и использоваться для нужд микроорганизмов.

Полученные результаты биохимических исследований хорошо согласуются с микробиологическими, что свидетельствует о сохранении устойчивости и выполнении микробиотой одной из главных концентрационно-трофических функций в почве, а также ее адаптации к техногенному воздействию.

Таким образом, проведенные по прошествии 27 лет с начала работы комбината исследования воздействия аэротехногенных поллютантов на микробиологические свойства почв в районе Костомукшского ГОКа свидетельствуют об изменении структуры микробного ценоза. На основании данных микробиально-биохимических исследований зону вокруг Костомукшского ГОКа можно условно разделить на импактную (до 2 км) и буферную (2–5 км). В импактной зоне прослеживается увеличение численности, изменение состава и функциональной активности микроорганизмов, а также активности ферментов. Поскольку перегруппировка микробного сообщества носит устойчивый характер, восстановление микробиологических свойств будет растянуто во времени, оптимизация микробиоты будет сопряжена с использованием энергетических эквивалентов, синтезируемых уже самой микрэкосистемой. В буферной зоне изменения микробоценоза отмечены на уровне тенденции: микробное сообщество, адаптируясь к новым условиям фитоценотической среды, формирует слабые эфемерные трофические связи, поэтому их реабилитация при снятии антропогенного пресса возможна.

## **Глава 5. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВ ГОРОДА ПЕТРОЗАВОДСКА**

### **Chapter 5. HEAVY METAL CONTAMINATION IN SOILS OF PETROZAVODSK**

Город Петрозаводск – столица Республики Карелия с развитой инфраструктурой и сложными градостроительными постройками. По оценке Федеральной службы государственной статистики, численность постоянного населения Петрозаводска на 1 января 2015 г. составляет 275 346 человек. Общая площадь города – 135 км<sup>2</sup>. Особенностью местоположения Петрозаводска является его большая протяженность вдоль Петрозаводской губы Онежского озера и расположение центральной его части между долинами рек Лососинки и Неглинки (Путеводитель экскурсий..., 1982). Административные границы города Петрозаводска включают в себя все побережье Петрозаводской губы, однако основной массив урбанизированной территории находится на юго-западном побережье, где и проводились наши исследования.

Промышленность города представлена машиностроением и металлообработкой, лесной и деревообрабатывающей, строительной, пищевой, легкой и полиграфической отраслями. В настоящее время в связи со спадом производства многие промышленные предприятия прекратили свое существование, но за довольно большой срок их эксплуатации в почве произошло накопление загрязняющих веществ, в том числе тяжелых металлов. Одним из основных загрязнителей территории Петрозаводска являлся Онежский тракторный завод, который функционировал в центре города с 1703 по 2008 г. Интенсивность и характер деятельности завода менялись неоднократно. Наиболее крупными промышленными предприятиями на территории города являются заводы «Авангард» и «Петрозаводскмаш». ООО ПМЗ «Авангард» занимается металлообработкой, судоремонтом, изготовлением не-

стандартного оборудования и плавучих средств. «Петрозаводск-маш» в настоящее время входит в группу компаний ОАО «Атом-энергомаш» машиностроительного дивизиона «РОСАТОМ» и занимается производством и поставкой корпусного, емкостного и другого оборудования для атомной, нефтехимической и целлюлозно-бумажной промышленности.

### **5.1. Экологическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почв города Петрозаводска**

### **5.1. Environmental assessment of heavy metal contamination in soils of Petrozavodsk**

На территории г. Петрозаводска ранее проводились исследования некоторых экологических характеристик почв (Рыбаков и др., 2013; Федорец, Медведева, 2005). По данным Н. Г. Федорец и М. В. Медведевой (2005), в почвах центральных районов выявлены высокие значения содержания свинца, никеля, цинка, меди и марганца по отношению к ПДК, а также серы по отношению к региональному фону. Это вызвало интерес к более подробному изучению содержания тяжелых металлов и серы в почвах на всей территории города в зависимости от категории землепользования (Ахметова, Новиков, 2014; Новиков, 2014а, 2015).

Территория г. Петрозаводска является областью контакта двух почвенно-ландшафтных зон: подзолистых почв от песчано-супесчаного до среднесуглинистого гранулометрического состава и торфяных и торфяно-глеевых на глинах и тяжелых суглинках (Федорец, Медведева, 2005). Морфологическое строение городских почв весьма разнообразно. Отмечаются как сильнонарушенные естественные почвы – трансформированные на глубину более 50 см, так и слабонарушенные – нарушения затрагивают только гумусово-аккумулятивные горизонты (Новиков, 2014б). На территориях, удаленных от городского массива, почвы сохраняют свое естественное строение.

Объектами исследований являлись антропогенно преобразованные почвы г. Петрозаводска. С целью изучения загрязнения почв тяжелыми металлами на территории города отобрано 96 смешан-

ных почвенных проб из верхнего 10-сантиметрового слоя. Для наиболее репрезентативного отбора образцов на карту города нанесли сетку с размером ячеек 1 км<sup>2</sup>, которая служила лишь ориентировочными границами, чтобы с 1 км<sup>2</sup> был отобран как минимум 1 почвенный образец. Непосредственно выбор мест опробования проводился при выполнении полевых работ с учетом рекомендаций (Стурман, 2003).

Отбор почвенных проб осуществлялся методом «конверта» с площадок 10 × 10 м, т. е. каждый образец состоял из почвы, отобранной по углам и в центре пробной площади.

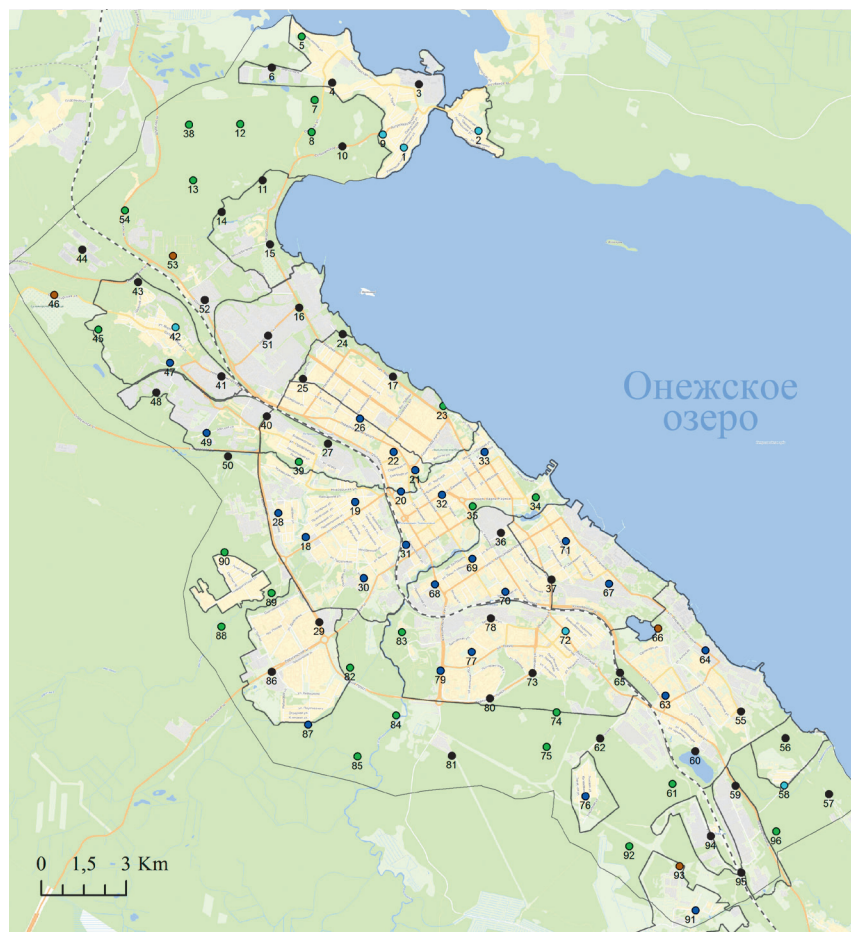
На каждой пробной площади проведен следующий перечень работ:

- определены географические координаты по системе GPS;
- отмечены близко расположенные дома, постройки, дороги и прочие элементы геотехсистемы;
- определена категория землепользования;
- выполнено описание растительного покрова;
- заложены почвенные прикопки;
- выполнено морфологическое описание почв;
- проведен отбор смешанных проб почвы для химических анализов в лабораторных условиях.

На территории города выделяли следующие основные категории землепользования, в соответствии с рекомендациями (Почва, город..., 1997):

- земли городской и сельской застройки – жилая часть (внутридворовые пространства, скверы, детские сады, школы и т. д.);
- земли общего пользования – промышленная зона (заводы, автохозяйства, ТЭЦ, склады, АЗС, крупные автодороги, аэропорты, железные дороги и т. д.);
- земли природно-рекреационной зоны (городские леса, лесопарки, парки, бульвары, скверы и т. д.);
- земли резерва (пустыри, свалки, карьеры).

В результате проделанной работы получили карту с нанесенными точками отбора почвенных проб на землях различных категорий землепользования (рис. 5.1.1).



Категория землепользования: ● - городская застройка, ● - сельская застройка, ● - общего пользования, ● - природно-рекреационная зона, ● - земли резерва

**Рис. 5.1.1.** Точки отбора почвенных проб на территории г. Петрозаводска  
**Fig. 5.1.1.** Soil sampling points in Petrozavodsk

В отобранных почвенных образцах определяли валовое содержание тяжелых металлов методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии (спектрофотометр AA-7000, Shimadzu, Япония) в ЦКП «Аналитическая лаборатория» ИЛ КарНЦ РАН.

Расчет комплексного показателя суммарного загрязнения  $Z_c$  производили с учетом среднего геометрического коэффициента концентрации и коэффициентов токсичности тяжелых металлов (Водяницкий, 2010).

Для сравнения загрязнения урбанизированной территории и естественных почв в качестве регионального фонового показателя использовали среднее содержание тяжелых металлов в минеральных подподстилочных горизонтах почв Карелии (Федорец и др., 2008). Кроме того, полученные данные сравнивали с действующими в России в настоящее время гигиеническими нормативами ГН 2.1.7.2041-06 (2006) и ГН 2.1.7.2511-09 (2009), где указаны значения ПДК и ОДК по валовому содержанию свинца, цинка, никеля, меди и марганца в почве. Также для сравнения использовали ПДК, представленные в работе К. Рэуце и С. Кырстя «Борьба с загрязнением почвы» (1986), так как это одна из первых крупных работ, где обобщен международный опыт по нормированию тяжелых металлов в почве.

Для составления тематических карт пространственного распределения тяжелых металлов в почве и по показателю суммарного загрязнения  $Z_c$  проводили интерполяцию полученных данных при помощи программного пакета ArcGIS ArcMap по методу Крикинга (ординарный крикинг). Шкалы для картосхем были подобраны на основании построенных гистограмм встречаемости тех или иных концентраций элементов в почвах. Для получения репрезентативных результатов при интерполяции данных из набора значений исключали точки с выпадающими значениями, которые определяли по облаку вариограммы/ковариации, в соответствии с рекомендациями, изложенными в руководстве пользователя ArcGIS Geostatistical Analyst (Руководство..., 2001). Такие точки на тематических картосхемах выделены красным цветом.

Для характеристики среднего содержания тяжелых металлов в почвах города приведены среднее арифметическое и среднее геометрическое значения. Это связано с тем, что показатели концентрации элементов в почвах сильно варьируют и не подчиняются закону нормального распределения, в результате чего среднее арифметическое сильно зависит от небольшого числа образцов с максимально высокими значениями. В таких случаях более надеж-

ным и правильным будет использование среднего геометрического для оценки содержания элементов в почве (Kabala et al., 2009; Shacklette, Boerngen, 1984).

По территории г. Петрозаводска большинство тяжелых металлов в почвенном покрове распределены неравномерно. Высокое значение коэффициента вариации (V) – более 33 % – говорит о неоднородной совокупности данных по концентрациям всех изучаемых элементов (табл. 5.1.1). Самый высокий показатель выявлен для концентрации свинца – 153 %. Наименьшие значения получены по содержанию цинка – 41 %, хрома – 42 % и кобальта – 43 %.

**Таблица 5.1.1.** Описательная статистика по содержанию тяжелых металлов в почвах г. Петрозаводска, мг/кг (n = 96 смешанных почвенных проб)

**Table 5.1.1.** Descriptive statistics for heavy metal contents in soils of Petrozavodsk, mg/kg (n = 96 composite soil samples)

Элемент (фон)	Среднее арифметиче- ское	Среднее геометриче- ское	Мини- мальное значение	Макси- мальное значение	$\sigma$	$\mu$	V, %
Pb (15,5)	35,3	23,0	2,5	441,8	54,1	5,5	153
Cu (18,5)	35,4	29,1	8,0	186,7	25,9	2,6	73
Zn (37,2)	69,8	63,5	18,6	136,4	28,7	2,9	41
Ni (27,5)	25,9	23,1	5,4	122,2	14,6	1,5	56
Co (11,6)	10,6	9,8	3,9	32,9	4,6	0,5	43
Cr (47,3)	29,9	27,4	7,2	79,0	12,5	1,3	42
Mn (282)	819,4	721,6	268,9	4349,6	521,0	53,2	64

Высокие значения стандартного отклонения ( $\sigma$ ) свидетельствуют о том, что данные по содержанию элементов, особенно марганца, сильно рассеяны от среднего значения, т. е. наблюдается широкий разброс. Минимальное стандартное отклонение получено для концентраций кобальта – 4,6. Стандартная ошибка среднего ( $\mu$ ) также особенно велика для значений, полученных по содержанию марганца, и минимальна для концентраций кобальта – 0,5.

В табл. 5.1.1 также представлены характеристики средних величин. Среднее содержание свинца, меди, цинка и марганца по представленным методам усреднения выше фоновых показателей, в то время как средние концентрации никеля, кобальта и хрома не достигают регионального фона.

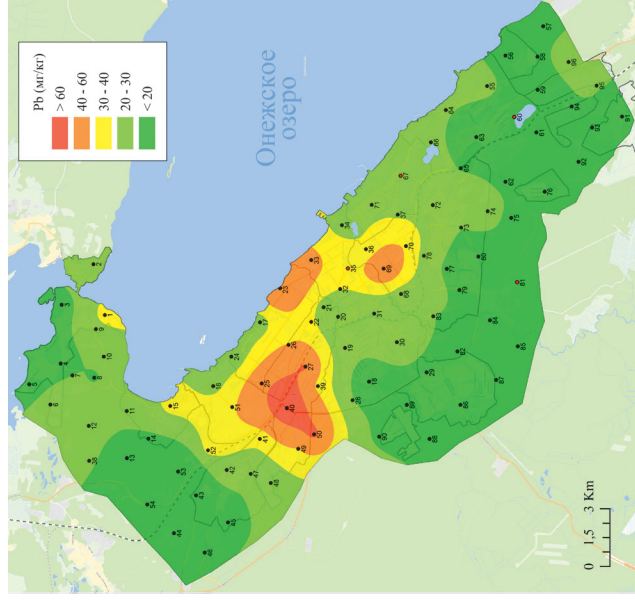
Среднее содержание **свинца** в почвах города составляет 35,3 мг/кг, что незначительно превышает ПДК/ОДК (32 мг/кг) (2006, 2009), но в 2 раза выше регионального фона (15,5 мг/кг). Однако рассчитанное нами среднее геометрическое значение составляет 23 мг/кг, что значительно ниже ПДК/ОДК.

По картосхеме (рис. 5.1.2) видно, что повышенным содержанием свинца характеризуется западная часть города с развитым промышленным сектором и, соответственно, большой антропогенной нагрузкой на почву. Значительное накопление свинца выявлено в почвах районов, характеризующихся повышенной плотностью автомобильного трафика, – Центр, Первомайский и Октябрьский районы. В местах повышенного скопления автотранспорта (обочины крупных дорог, автогаражи) высокие уровни накопления свинца, вероятно, обусловлены использованием до недавнего времени бензина, содержащего тетраэтилсвинец.

Максимальное (выпадающее) значение по содержанию свинца отмечено на землях городской застройки в микрорайоне Зарека вблизи жилых домов и автогаражей (точка № 67) – 441,8 мг/кг. При этом следует отметить, что в радиусе 500 м находится промышленная зона.

В почвах городского парка «Ямка» (ранее парк Онежского тракторного завода), расположенного в самом центре города, также выявлено одно из выпадающих значений по содержанию свинца – 202,8 мг/кг (точка № 35). Данная территория представляет собой естественное понижение рельефа между проспектом Карла Маркса и рекой Лососинкой. Как следует из устаревшего названия парка, на берегу реки находится Онежский тракторный завод, функционирующий до 2008 г. Профильная деятельность завода менялась неоднократно: в конце XVIII в. здесь располагался Александровский пушечно-литейный завод, который использовал площадку, где в настоящее время обустроен парк, под свалку шлаков (Ициксон, Лантратова, 2009). В районе Голиковка, где находится основная территория завода, содержание свинца в почвах также повышено и составляет 142,2 мг/кг (точка № 69). По мере удаления от центра города наблюдается заметное снижение концентрации свинца в почвах.



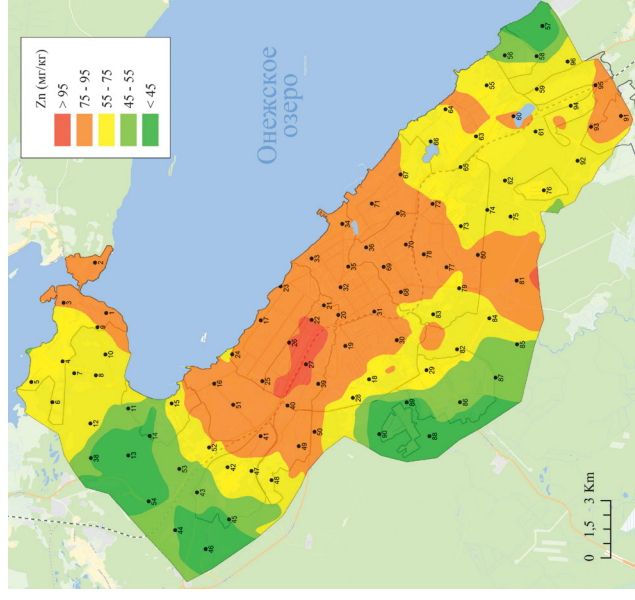


● — точка отбора почвенной пробы

● — точка с выпадающим значением

**Рис. 5.1.2.** Картограмма содержания свинца в почвах г. Петрозаводска

**Fig. 5.1.2.** Content of lead in soils of Petrozavodsk



● — точка отбора почвенной пробы

**Рис. 5.1.3.** Картограмма содержания цинка в почвах г. Петрозаводска

**Fig. 5.1.3.** Content of zinc in soils of Petrozavodsk

Самым слабозагрязненным свинцом, по сравнению с другими районами города, является микрорайон Древянка, где его содержание не превышает 20 мг/кг. Это связано с тем, что данный район один из наиболее «молодых» и значительно удален от центра города, а также от наиболее крупных промышленных предприятий.

Таким образом, проведенные исследования показали, что наиболее высокое загрязнение свинцом почв выявлено на землях категории общего пользования (до 170,3 мг/кг) и городской застройки (до 441,8 мг/кг). Важно отметить, что на землях общего пользования концентрация свинца на отдельных участках увеличивается с глубиной и может достигать 34 ПДК в нижележащих почвенных горизонтах.

Наименьшие показатели характерны для почв земель резерва (до 22,3 мг/кг), ввиду удаленности от центральных районов города. Также невысокие значения выявлены для земель природно-рекреационной зоны, особенно для пробных площадей, расположенных в пригородных лесах. Здесь содержание свинца превысило ПДК/ОДК (32 мг/кг) лишь на одной пробной площади № 74, заложенной на территории небольшой несанкционированной свалки (53,8 мг/кг).

Среднее содержание **цинка** в почвах г. Петрозаводска превышает фоновый показатель (37,2 мг/кг) и значение ОДК (55 мг/кг), установленное для России, однако намного ниже ПДК (300 мг/кг), представленного в работе К. Рэуце, С. Кырстя (1986).

Содержание цинка в почвах Петрозаводска в основном превышает ОДК (55 мг/кг) и колеблется от 18,6 до 136,5 мг/кг (рис. 5.1.3). Наиболее высокой концентрацией характеризуются почвы на землях городской застройки. Максимальное значение отмечено в Первомайском районе во дворе жилых домов (точка № 26) – 136,5 мг/кг. На землях общего пользования максимальная концентрация цинка – 131,8 мг/кг – выявлена на пробной площади № 81, заложенной в южной части города на территории комплекса автогазажей. На землях сельской застройки максимальное значение – 106,6 мг/кг – отмечено в районе Соломенного (точка № 1). В зеленой зоне города самый высокий показатель содержания цинка выявлен на обочине лесной дороги (точка № 74) – 95,6 мг/кг, где население несанкционированно складировало бытовой мусор. На землях резерва концентрация цинка в почве менее 80 мг/кг.

Таким образом, на территории города прослеживается тенденция к накоплению цинка на урбанизированной территории, включая промышленные зоны. Исключение составляют районы, удаленные от Центра города: Древлянка, Университетский городок, ТИЗ «Усадьбы».

Среднее значение концентрации **никеля** в почвах города находится в пределах регионального фона, составляющего 27,5 мг/кг. Рассчитанное нами среднее геометрическое значение – 23,1 мг/кг. Ориентировочно допустимая концентрация никеля в почвах по нормативам, принятым в России, – 20 мг/кг, однако уровень ПДК (Рэуце, Кырстя, 1986) выше и равен 50 мг/кг.

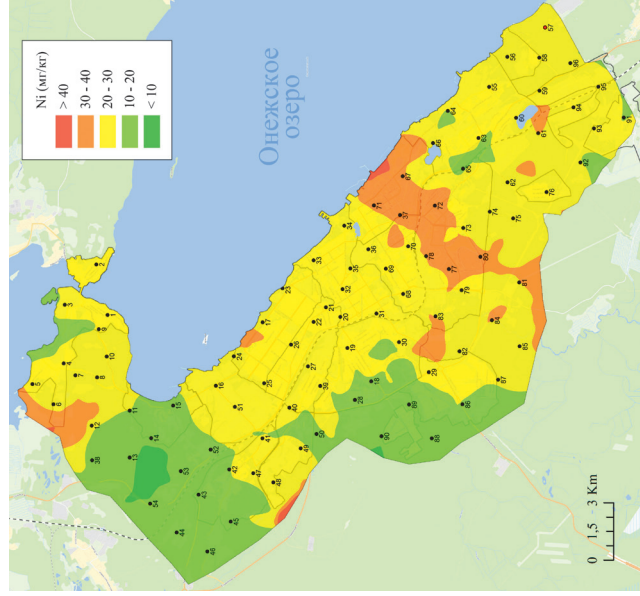
Как видно на картосхеме (рис. 5.1.4) в целом по территории Петрозаводска проявляется тенденция к накоплению никеля в почвах центральной и южной частей города, включая пригородные леса, а также в почвах, прилегающих к промышленным зонам города.

В процессе исследований выявлена лишь одна точка (№ 57) с выпадающим значением по содержанию никеля, которое составляет 122,2 мг/кг. Данная пробная площадь заложена на землях общего пользования в южной части города вблизи железной дороги, которая используется для перевозки грузов с Петрозаводской нефтебазы.

Значения, превышающие ПДК (50 мг/кг), зафиксированы на землях общего пользования: в районе Соломенного вблизи деревообрабатывающих предприятий (точка № 6) – 55,8 мг/кг и на территории промышленной зоны в районе Рыбка (точка № 48) – 61,8 мг/кг. Незначительно завышена концентрация никеля в почвах пригородных лесов на территории несанкционированной свалки бытового мусора (точка № 8) – 53,6 мг/кг. На землях категории городской и сельской застройки, а также на землях резерва не зафиксировано значений, превышающих ПДК. Однако уровень ОДК превышен в большинстве почвенных проб независимо от категории землепользования.

В России для валового содержания **хрома** в почвах нормативы не установлены. Уровень ПДК, предложенный К. Рэуце и С. Кырстя (1986), составляет 100 мг/кг.

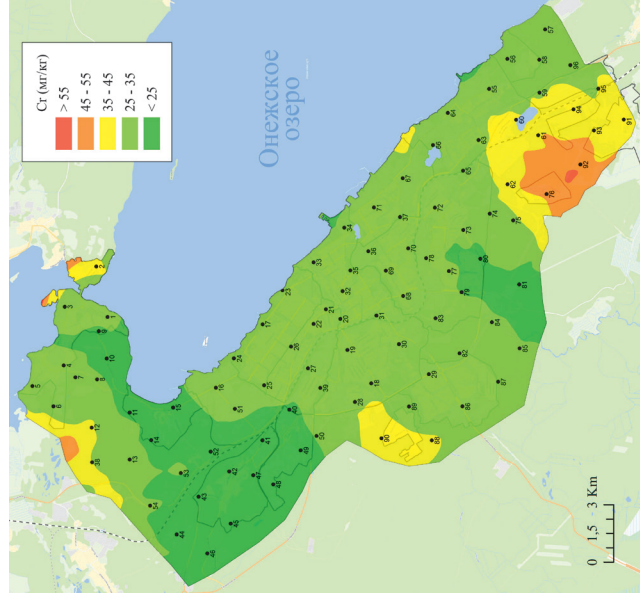
Среднее значение содержания хрома в почвах города в 3 раза меньше ПДК, а также ниже уровня регионального фона (47,3 мг/кг).



- — точка отбора почвенной пробы
- — точка с выпадающим значением

**Рис. 5.1.4.** Картограмма содержания никеля в почвах г. Петрозаводска

**Fig. 5.1.4.** Content of nickel in soils of Petrozavodsk



- — точка отбора почвенной пробы

**Рис. 5.1.5.** Картограмма содержания хрома в почвах г. Петрозаводска

**Fig. 5.1.5.** Content of chromium in soils of Petrozavodsk

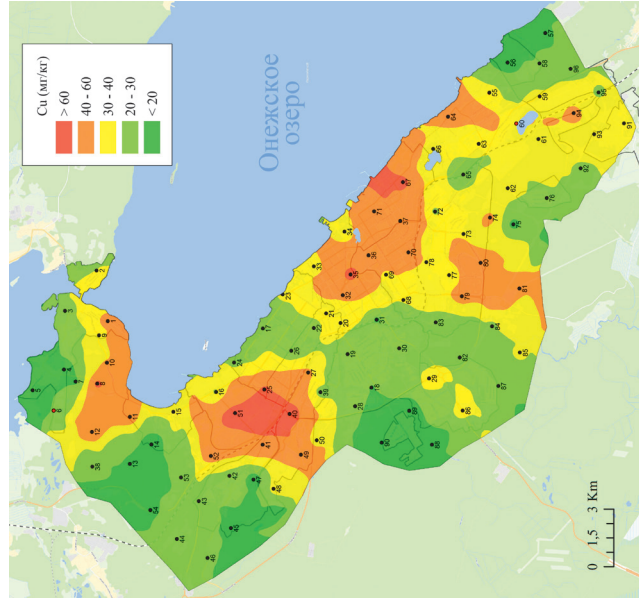
Концентрация хрома в почвах варьирует от 7,2 до 79 мг/кг, что не превышает уровень ПДК. Судя по картосхеме, представленной на рис. 5.1.5, проявляется тенденция к накоплению хрома в почвах южной части города в районах Птицефабрики и Южной промзоны. Максимальный показатель отмечен в зеленой зоне около родника (точка № 61) – 79 мг/кг. Повышенная концентрация хрома выявлена в почвах в районе Соломенное на землях общего пользования вблизи деревообрабатывающего предприятия (точка № 6) – 74,2 мг/кг.

Завышенные показатели относительно регионального фона отмечены в небольшом количестве почвенных образцов (<25 %), отобранных на землях категории общего пользования, городской застройки и природно-рекреационной зоны. В целом можно сделать вывод, что почвы Петрозаводска не загрязнены хромом. Как низкие, так и повышенные значения встречаются в почвах независимо от категории землепользования.

Среднее содержание *меди* в почвах города составляет 35,4 мг/кг, что в два раза превышает региональное фоновое значение (18,5 мг/кг). Среднее геометрическое для концентрации меди в почвах города – 29,1 мг/кг, что также превышает значение фона и близко к уровню ОДК (33 мг/кг).

По картосхеме пространственного распределения меди в почвах (рис. 5.1.6) заметна тенденция к накоплению элемента в центральной части города и вблизи промышленных зон. Уровень ОДК превышен практически на всей территории города в большинстве почвенных проб. Следует отметить повышенные показатели содержания меди в почвах зеленой зоны на территории несанкционированной свалки бытового мусора (точка № 6) – 81,9 мг/кг и в почвах искусственно созданного парка «Ямка» (точка № 35) – 85,5 мг/кг. На территории городской застройки концентрация меди не превышает 75 мг/кг.

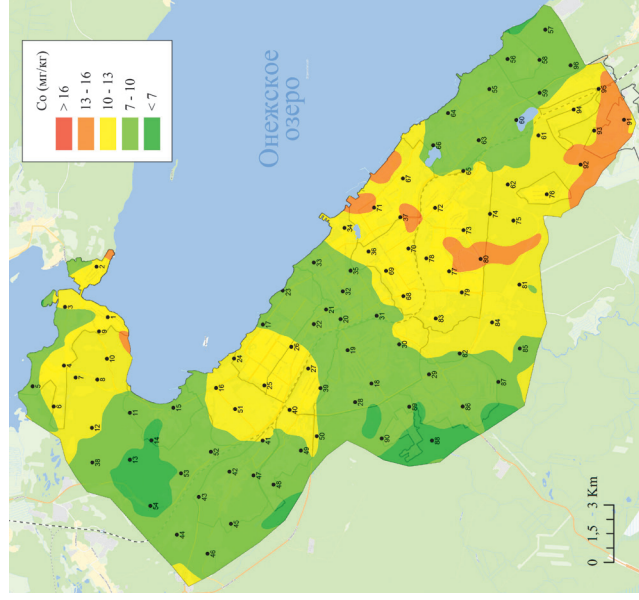
Показатель ПДК (100 мг/кг) (Рэуце, Кырстя, 1986) превышен лишь в двух почвенных образцах, отобранных на землях общего пользования: в районе Соломенного в непосредственной близости от деревообрабатывающего предприятия на обочине дороги (точка № 6) – 186,7 мг/кг, где часто движется грузовой транспорт, работающий на дизельном топливе; и в районе Ключевой на берегу озера Четырехверстного (точка № 60) – 122,1 мг/кг, здесь жители несанкционированно моют свои автомобили. Данные значения определены как выпадающие.



- — точка отбора почвенной пробы
- — точка с выпадающим значением

**Рис. 5.1.6.** Картограмма содержания меди в почвах г. Петрозаводска

**Fig. 5.1.6.** Content of cooper in soils of Petrozavodsk



- — точка отбора почвенной пробы

**Рис. 5.1.7.** Картограмма содержания кобальта в почвах г. Петрозаводска

**Fig. 5.1.7.** Content of cobalt in soils of Petrozavodsk

Для валового содержания **кобальта** в почвах российские нормативы не разработаны, в связи с этим для сравнения использовали ПДК – 50 мг/кг (Рэуце, Кырстя, 1986).

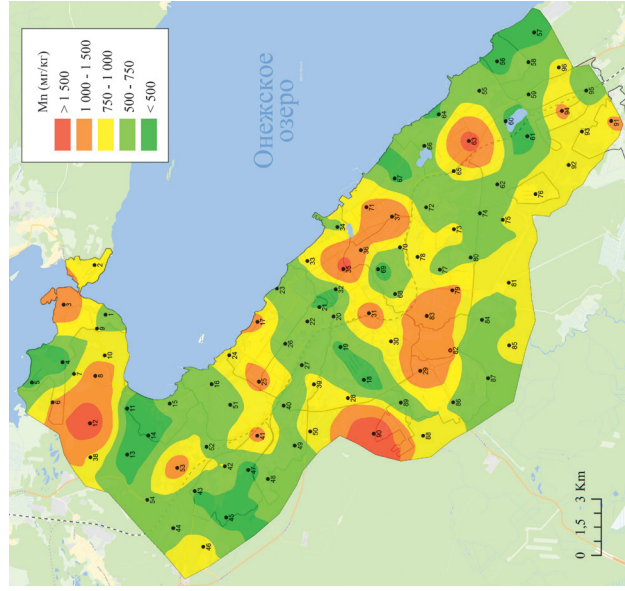
Среднее значение концентрации кобальта в почвах города в 5 раз ниже ПДК и близко к региональному фоновому содержанию – 11,6 мг/кг.

Концентрация кобальта в почвах г. Петрозаводска невысока и варьирует от 3,9 до 32,9 мг/кг. Максимальный показатель отмечен на территории несанкционированной свалки в зеленой зоне города между районами Пески и Соломенное (точка № 8) – 32,9 мг/кг. По картосхеме (рис. 5.1.7) прослеживается небольшое накопление элемента вблизи промышленных зон города – Северная и Южная промзона, а также выявлено увеличение концентраций в районах Зарека и Кукковка. Стоит отметить, что кобальт является необходимым элементом для всех живых организмов (Сапрыкин, 1984), но при высоких концентрациях становится токсичным. Однако проблемой является, скорее, его недостаток в почве, чем избыток. В почве отмечается дефицит кобальта при его содержании менее 5 мг/кг (Федорец и др., 2008). В почвах Петрозаводска отмечены крайне низкие концентрации кобальта на 5 пробных площадях различных категорий землепользования, за исключением земель сельской застройки. Наиболее низкое значение – 3,9 мг/кг – выявлено на землях резерва вблизи совхоза «Тепличный» (точка № 53).

Уровень ПДК (50 мг/кг) не превышен ни в одном почвенном образце. Таким образом, почвы г. Петрозаводска не загрязнены кобальтом, а в отдельных случаях отмечается его недостаток.

При характеристике валового содержания **марганца** в почвах города использовали уровень ПДК, представленный в гигиенических нормативах ГН 2.1.7.2041-06 (2006), – 1500 мг/кг.

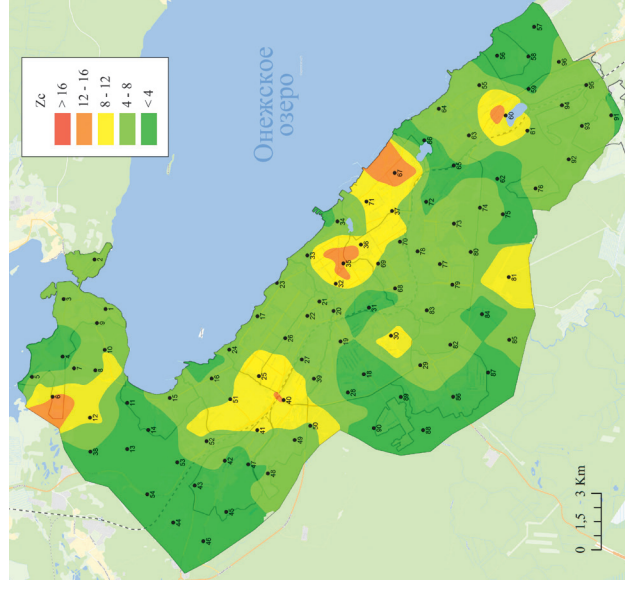
Среднее содержание марганца в почвах города в три раза выше уровня регионального фона, который составляет 282 мг/кг, но при этом не превышает ПДК (1500 мг/кг). Судя по картосхеме (рис. 5.1.8), можно сделать вывод, что в целом по городу содержание марганца в почве распределено неравномерно. Выпадающее значение по содержанию марганца отмечено лишь в одной точке № 82 на территории зеленой зоны (ельник) между районами Древлянка и Кукковка – 4349,6 мг/кг.



- — точка отбора почвенной пробы
- — точка с выпадающим значением

**Рис. 5.1.8.** Картограмма содержания марганца в почвах г. Петрозаводска

**Fig. 5.1.8.** Content of manganese in soils of Petrozavodsk



- — точка отбора почвенной пробы

**Рис. 5.1.9.** Картограмма загрязнения почв г. Петрозаводска тяжёлыми металлами по показателю Zc

**Fig. 5.1.9.** Heavy metal contamination in soils of Petrozavodsk by the integrated pollution index Zc



Высокие показатели, относительно ПДК (1500 мг/кг), отмечены в трех точках на землях природно-рекреационной зоны, а именно: в смешанном лесу вблизи района Университетский городок (точка № 90) – 2202,7 мг/кг; в пригородном еловом лесу между районами Пески и Соломенное в 2 км от города (точка № 12) – 2055,7 мг/кг; в городском парке «Ямка» Центрального района города (точка № 35) – 1723,2 мг/кг.

На землях категории городской застройки превышение ПДК зафиксировано в одном почвенном образце, отобранном на территории Детского сада № 64 в районе Ключевая (точка № 63) – 1815 мг/кг.

Повышенное содержание марганца в поверхностном горизонте почвы на землях природно-рекреационной зоны связано, по нашему мнению, с тем, что марганец является биофильным элементом, принимает участие в окислительно-восстановительных процессах, фотосинтезе, дыхании, углеводном и белковом обмене (Yoardar et al., 1991). В связи с вышесказанным происходит его биогенное накопление в поверхностных горизонтах почвы, в частности, в лесной подстилке, формирующейся из растительного опада. В большинстве образцов количество марганца выше уровня фона, но ниже уровня ПДК, независимо от категории землепользования. Высокие уровни содержания марганца проявляются на территории города локально, что не опасно, так как данный элемент не является токсичным загрязнителем. Однако при высоких концентрациях проявляется его фитотоксичность (Алексеев, 1987).

На заключительном этапе исследования проведена оценка загрязнения почв г. Петрозаводска тяжелыми металлами (Pb, Cr, Cu, Co, Ni, Mn, Zn) по **комплексному показателю суммарного загрязнения – Zc**. Он был рассчитан для каждой пробной площади, и по полученным данным построена картосхема (рис. 5.1.9). На территории города максимальное значение Zc – 19,4. Согласно существующим нормативам (Выборов и др., 2004; Гигиеническая оценка..., 1999) при величине суммарного показателя Zc менее 16 почва относится к категории загрязнения «допустимой», 16–32 – к категории загрязнения «умеренно опасной». В нашем случае превышение порога допустимой категории загрязнения отмечено лишь

в одном почвенном образце, поэтому при составлении шкалы для картосхемы в качестве верхней границы выбрано значение 16 и использован равномерный шаг – <4, 4–8, 8–12, 12–16 и >16.

По картосхеме суммарного загрязнения почв заметно увеличение показателя  $Z_c$  в центральной части города, где расположен Онежский тракторный завод, на территории промышленной зоны района Зарека, вблизи деревообрабатывающих предприятий в районе Соломенное, а также в районах Рыбка и Северная промзона. Максимальное значение по показателю  $Z_c = 19,4$  (умеренно опасная категория загрязнения) выявлено на пробной площади № 35, заложенной в городском парке «Ямка». Здесь отмечено высокое содержание свинца – 6ПДК, а также повышены относительно ОДК/ПДК концентрации меди, никеля и марганца.

В остальных случаях комплексный показатель суммарного загрязнения ( $Z_c$ ) находится на уровне «допустимой» категории загрязнения почв.

В настоящее время Петрозаводск не является крупным промышленным центром, в связи с этим здесь наблюдаются невысокие уровни комплексного загрязнения почв тяжелыми металлами. В качестве сравнения на территории более крупного города на северо-западе России Санкт-Петербурга, по данным сотрудников ФГУ ГП «Урангео», отмечены показатели  $Z_c$  до 7910 (Сорокин и др., 2012), что во много раз превышает максимальное значение, полученное на территории г. Петрозаводска (19,41). Среднее значение показателя  $Z_c$  для территории Петрозаводска составляет 5,5, т. е. почвы имеют минимальный низкий уровень загрязнения и соответствуют допустимой категории загрязнения. По показателям здоровья населения данной категории соответствует наиболее низкий уровень заболеваемости детей и минимальная частота встречаемости функциональных отклонений (Гигиеническая оценка..., 1999).

По данным проведенных ранее исследований в почвах центральных районов г. Петрозаводска (Федорец, Медведева, 2005) приоритетным загрязнителем является свинец, что подтверждается и нашим исследованием. Картосхемы валового содержания тяжелых металлов показывают, что почвы города характеризуются низкими уровнями накопления кобальта и хрома. Однако выявлено

повышенное содержание цинка, никеля и меди относительно принятых в России нормативов.

## **5.2. Микробиологическая оценка почв города Петрозаводска**

## **5.2. Microbiological assessment of soils in Petrozavodsk**

Исследование микробоценозов почв г. Петрозаводска можно условно разделить на три этапа. На первом этапе была изучена численность микроорганизмов важнейших эколого-трофических групп в почвах различных категорий землепользования. Для этого была проведена оценка состояния микробного сообщества и даны рекомендации по рекультивации почв урбанизированных территорий. Результаты работы были отражены в ранее опубликованной монографии (Федорец, Медведева, 2005). Наиболее используемые санитарно-гигиенические методы оценки качества почв города были представлены в методических рекомендациях (Федорец, Медведева, 2009). Второй этап исследования предусматривал детальный анализ микробных сообществ, инвентаризацию микроорганизмов, дальнейший поиск биоиндикаторов состояния почв различных категорий землепользования. На данном этапе более подробно было изучено влияние авто- и железнодорожной магистрали на биологическую активность почв, были апробированы и всесторонне использованы в практике микробиологического мониторинга почв модельные полевые эксперименты (Медведева и др., 2014). Также впервые для почв города была изучена микробиологическая трансформация растительного опада растений-эдификаторов, произрастающих в зоне рекреации города (Медведева, 2010).

На третьем, современном этапе продолжают исследования микробоценоза почв, прилегающих к авто- и железнодорожным магистралям, по установлению порога чувствительности микроорганизмов к тяжелым металлам (аэрополлютантам) в зависимости от их систематического положения, а также биологической активности почв на фоне флуктуации факторов педосреды. Последнее предусматривает не только определение таксономической структуры микробоценоза, но и его функциональной активности, изменение которой всегда проявляется

на более поздних этапах деградации почв. В целом высокая чувствительность микроорганизмов к нарушению почвенно-химических показателей и информативность микробиологических параметров позволяют использовать их при проведении природоохранных мероприятий. Способность микробоценоза к аккумуляции, биодеструкции поллютантов и биоремедиации почв определяет их большую роль в поддержании гомеостаза всей урбоэкосистемы, делает значимыми проводимые в этой области исследования (Евдокимова, 1995; Звягинцев, 1987).

С целью анализа состояния почв г. Петрозаводска были заложены пробные площадки, местоположение которых определялось категорией землепользования:

- в районе крупных промышленных предприятий на различном удалении от источника загрязнения;
- в местах отдыха населения города;
- во дворах школ и детских садов;
- вдоль железнодорожных магистралей и крупных автомобильных дорог;
- на территории, прилегающей к свалке промышленных отходов в пос. Соломенное.

В районе крупных промышленных предприятий участки располагались на различном удалении от источника загрязнения. Подробная характеристика объектов исследования приводится в монографии (Федорец, Медведева, 2005).

Почвы для микробиологических анализов отбирали по глубине – 0–5 и 5–10 см. Описание микробных сообществ изучаемых почв проводили на основании общепринятых методов (см. главу 3.2).

### Микробоценозы почв зоны рекреации

Как известно, существуют различные предположения о формировании устойчивости микробного блока почв к антропогенному воздействию. При этом наибольшее внимание заслуживает гипотеза о гипертрофии микробной биомассы, а также способности многих систематических групп микроорганизмов находиться в латентном состоянии достаточно долго, однако становиться активными при элиминировании конкурентов в условиях негативного воздействия (Громов, Павленко, 1989; Звягинцев, 2001; Полянская и др., 1995). Проведенные исследования показали, что наибольшую чис-

ленность микроорганизмов исследуемых эколого-трофических групп наблюдали в верхнем гумусированном слое почв, в нижележащем минеральном слое их численность была ниже (табл. 5.2.1). Размах колебания численности также изменялся от верхних горизонтов почв к нижним. Наиболее чувствительными к антропогенному воздействию в микробном сообществе были прокариоты. Численность бактерий, утилизирующих органические и минеральные формы азота, была высокой, что свидетельствует об энергично идущих мобилизационных процессах органического вещества.

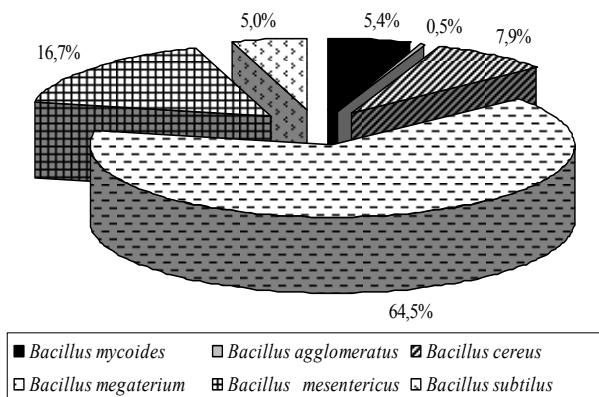
**Таблица 5.2.1.** Диапазон изменения численности микроорганизмов в почвах рекреационной зоны города, тыс. КОЕ/г почвы

**Table 5.2.1.** Range of variation of microorganism numbers in soils of the urban recreational area, 1000 CFU/g of soil

Глубина отбора, см	Бактерии			Актиномицеты	Микромицеты	КЦМ
	использующие N-NH <sub>2</sub>		потребляющие N-NO <sub>3</sub>			
	общее	спорообразующие				
Губернаторский парк						
0-5	<u>4710-11 266*</u> 9131	<u>62-8316</u> 2842	<u>942-23 318</u> 10 892	<u>236-10 218</u> 4656	<u>59-440</u> 290	<u>9-13</u> 12
5-10	<u>5544-8510</u> 7587	<u>920-2376</u> 1522	<u>536-11 880</u> 5494	<u>230-5082</u> 2682	<u>81-416</u> 226	<u>8-33</u> 19
Парк Прибрежный и Левашовский бульвар						
0-5	<u>6004-12 384</u> 8775	<u>1176-2844</u> 2108	<u>14 994-63 360</u> 40 002	<u>1264-16 704</u> 8537	<u>190-691</u> 509	<u>6-58</u> 36
5-10	<u>5548-13 118</u> 9416	<u>1974-9834</u> 4715	<u>5840-19 458</u> 12108	<u>2336-10 998</u> 5703	<u>161-641</u> 460	<u>3-60</u> 31
Сквер Титова						
0-5	<u>5796-12 420</u> 8756	<u>1932-3660</u> 2508	<u>8694-56 304</u> 26 912	<u>0-4508</u> 2847	<u>322-400</u> 350	<u>3-16</u> 11
5-0	<u>3096-12 690</u> 7686	<u>1290-8460</u> 3789	<u>2424-36 942</u> 17508	<u>0-1212</u> 780	<u>202-268</u> 243	<u>6-10</u> 8
Средние данные						
0-5	<u>4710-12 420</u> 8887	<u>62-8316</u> 2486	<u>942-63 360</u> 25 942	<u>0-16 704</u>	<u>59-691</u> 383	<u>3-58</u> 20
5-0	<u>3096-12 690</u> 8230	<u>920-9842</u> 3342	<u>536-36 942</u> 11 703	<u>230-10 998</u> 3066	<u>81-641</u> 310	<u>3-60</u> 19

\* Здесь и в табл. 5.2.2–5.2.4: над чертой – диапазон изменения численности, под чертой – средние данные.

В составе спорообразующих аммонифицирующих бактерий доминируют *Bacillus megaterium*, *B. mesentericus*, которые утилизируют азотсодержащие органические соединения на более поздней стадии их трансформации (рис. 5.2.1).



**Рис. 5.2.1.** Таксономический состав спорообразующих сапротрофных бактерий

**Fig. 5.2.1.** Taxonomic composition of spore-forming saprotrophic bacteria

Способность спорообразующих бактерий сохранять устойчивость к антропогенному воздействию позволяет им поставлять в почву богатые макроэргическими связями соединения, а также более простые мономеры, используемые другими участниками микробного сообщества (Громов, Павленко, 1989).

Как известно, актиномицеты предпочитают почвы с оптимальным сочетанием элементов минерального питания, водного и термического режимов. В изучаемых почвах отмечали высокую численность мицелиальных прокариот в составе минерализаторов минеральных соединений азота, которые обеспечивают круговорот элементов-биогенов на достаточно высоком уровне в биоценозе.

В структуре микробиоценоза численность микромицетов была невысокой. Вместе с тем, имея достаточно низкий порог чувствительности, они могут быстро адаптироваться к неблагоприятным воздействия и поэтому сохранять важнейшую функцию в почве –

гидролитическую. Состав микоценоза почв был гетерогенным, доминировали представители рода *Mucor*, *Penicillium*, эпизодически встречались р. *Trichoderma*, *Dematium*.

Изменение физико-химических свойств почв (плотность сложения, емкость катионного обмена, кислотнo-щелочные свойства, содержание макро- и микроэлементов) является фактором, который достаточно сильно оказывает влияние на все звенья трофоцепи. При этом если произошла перестройка в микробном сообществе, то она закрепляется и остается даже при снятии негативного воздействия. Подтверждением этого, а также перманентно идущих процессов деполимеризации углеродсодержащих соединений природного и, возможно, антропогенного происхождения является изменение численности и состава комплекса целлюлозоразрушающих микроорганизмов.

Анализ структуры микробного сообщества был бы неполным, если бы не провели его оценку с точки зрения функционирования микроорганизмов как единой триады: эвтрофы – гидролитики – педотрофы, при этом учитывали их пространственное распределение в почвенном локусе (табл. 5.2.2).

**Таблица 5.2.2.** Структура микробного сообщества минерального горизонта почв рекреационной зоны города, тыс./см<sup>3</sup> почвы  
**Table 5.2.2.** Structure of the microbial community in the mineral horizon of soils in the urban recreational area

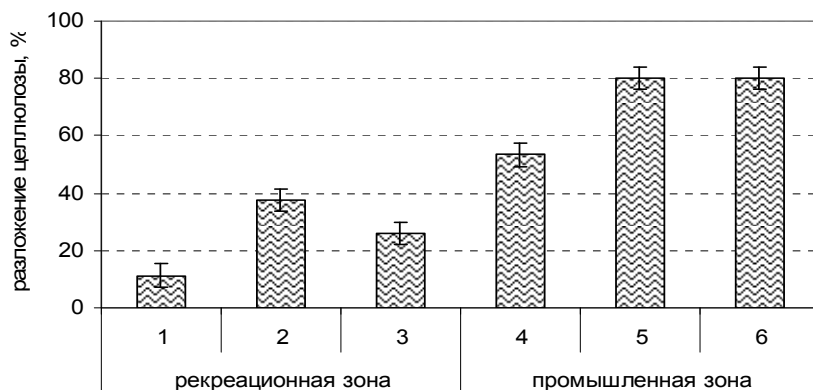
Эвтрофная ассоциация		Гидролитическая ассоциация			
Бактерии, использующие		Микромицеты	Спорообра- зующие	Актиноми- цеты	КЦМ
N-NH <sub>2</sub>	N-NH <sub>4</sub>				
Губернаторский парк					
<u>2218–11 829</u> 7492	<u>450–8131</u> 4133	<u>113–217</u> 169	<u>950–1626</u> 1242	<u>225–5692</u> 2074	<u>11–21</u> 14
Парк Прибрежный и Левашовский бульвар					
<u>3606–7343</u> 5695	<u>1263–1518</u> 2763	<u>105–370</u> 278	<u>1263–5507</u> 2763	<u>1518–7039</u> 3576	<u>2–34</u> 18
Сквер Титова					
<u>2415–8249</u> 4548	<u>994–24 012</u> 11756	<u>83–201</u> 153	<u>663–5499</u> 2389	<u>0–497</u> 410	<u>3–7</u> 5
Средние данные					
5912 ± 1484	7788 ± 3822	200 ± 68	2132 ± 791	2020 ± 1583	12 ± 7

Полученные наблюдения подтвердили доминирование в почве эвтрофной ассоциации микроорганизмов, которые по репродуктивной стратегии популяции относятся к группе r-стратегов. Для нее характерны быстрое освоение новых экологических ниш, интенсивная утилизация легкоминерализуемых азот- и углеродсодержащих соединений, неглубокая трансформация органического вещества в почве. Они являются жесткими конкурентами за субстрат с корневыми системами растений, адаптационный потенциал которых в условиях агрессивной городской среды низкий. В отличие от эвтрофной гидролитическая ассоциация микроорганизмов немногочисленна. Однако их способность осуществлять трансформацию трудноминерализуемых веществ и тем самым синтезировать центроболиты, интенсивно используемые различными таксономическими группами микроорганизмов, создает предпосылки для роста их численности, а следовательно, повышения устойчивости всего микробного сообщества к урбанистическому прессу.

Актуальная целлюлозолитическая активность почв является показателем жизнедеятельности всей микробиоты. Разложение целлюлозного полотна в исследуемых почвах составляет до 40 % (рис. 5.2.2). Анализ комплекса целлюлолитиков и его функциональной активности позволяет сделать вывод, что данные микроорганизмы играют важную роль в поддержании гомеостаза микробценоза почв: чем выше их биоразнообразие, а следовательно, и разнообразие ферментных систем, тем шире спектр образуемых ими органических веществ, потребляемых микроорганизмами.

В целом, анализируя структуру и состав микробного сообщества почв рекреационной зоны Петрозаводска, следует отметить, что наибольшим биоразнообразием, так же как и численностью микроорганизмов, характеризуются верхние органоминеральные горизонты почв, что, безусловно, является свидетельством и более высокой их функциональной активности. Исследование микробного сообщества с помощью хемато-масс-спектрометрического метода и методов культивирования позволило установить его качественный состав (рис. 5.2.3). При этом микроорганизмы, принадлежащие к различным таксономическим группам, однако выполняющие одинаковые экологические функции в почве, условно разделили на три группы. Первая группа включает микроорганизмы, способные расти





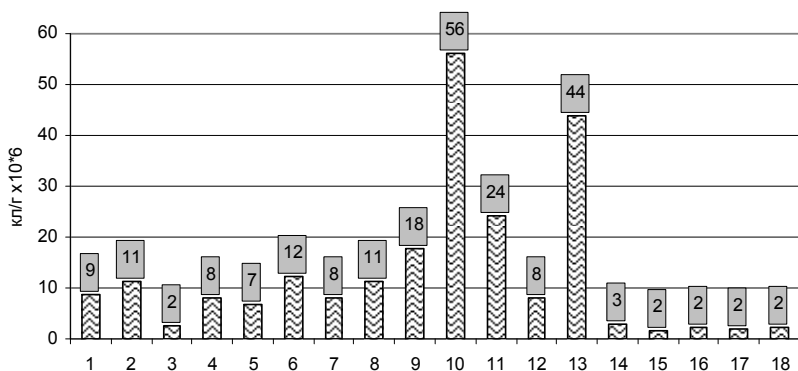
**Рис. 5.2.2.** Целлюлозолитическая активность почв различных категорий землепользования города:

1 – Губернаторский парк, 2 – парк Прибрежный, 3 – Левашовский бульвар, 4 – «Тяжбуммаш», 5 – «Авангард», 6 – «ОТЗ»

**Fig. 5.2.2.** Cellulolytic activity of soils in different land use categories in the city:

1 – Gubernatorsky Park, 2 – Waterside park, 3 – Levashovsky boulevard, 4 – Tyazhbummash plant premises, 5 – Avangard shipyard premises, 6 – OTZ plant premises

в любых педоусловиях, например, представители *Pseudomonas* sp. Вторая группа объединяет микроорганизмы, которые не испытывают дискомфорта при росте в среде pH почв ниже 4, например, *Ruminococcus* sp. Также была выделена группа, которая достаточно требовательна к содержанию азота и углерода, например, представители рода *Cytophaga*. Вместе с тем надо отметить, что подобное разделение микроорганизмов на группы условно, так как они являются взаимообусловленными и взаимосвязанными. При недостатке энергетического субстрата для развития микробов они, как известно, способны быстро переключаться с одного типа метаболизма на другой и, следовательно, приспосабливаться к иным экологическим условиям (Громов, Павленко, 1989). Также можно согласиться с предположением о том, что при возрастании загрязняющих веществ в педосфере происходит формирование микробного сообщества, обогащенного устойчивыми к высоким концентрациям тя-



**Рис. 5.2.3.** Состав микробного сообщества почв г. Петрозаводска:

1 – *Acetobacter-Rhodobacter* group; 2 – *Methylococcus/Clostridium* sp.; 3 – *Pseudomonas fluorescens*; 4 – *Sphingomonas* sp.; 5 – *Desulfovibrio* sp.; 6 – *Nitrobacter* sp.; 7 – *Micrococcus/Arthrobacter* sp.; 8 – *Clostridium pasteurianum*; 9 – *Butyrivibrio* 7S-14-3; 10 – микобактерии по 10Me18; 11 – *Ruminococcus* sp. +\*\*; 12 – *Streptomyces-Nocardiopsis*; 13 – *P. freudenreichii*; 14 – *Actinomadura roseola*; 15 – *Cytophaga* sp.; 16 – *Caulobacter*; 17 – *Sphingobacterium spiritovorum*; 18 – *Bacillus subtilis*

**Fig. 5.2.3.** Composition of the microbial community in Petrozavodsk City soils

железных металлов микробами – грибами, по сравнению с бактериями, адаптированными к более низким концентрациям загрязнителей (Летунова и др., 1982).

#### Микробоценозы почв промышленных зон города

Проведенные исследования показали, что, несмотря на длительный антропогенный пресс (см. глава 4.1.), элиминирования отдельных эколого-трофических групп микроорганизмов не наблюдали: структура микробного сообщества в целом сохраняла черты, которые свойственны природным, ненарушенным микробоценозам (табл. 5.2.3). В составе выбросов промышленных предприятий присутствуют кислотообразующие вещества и тяжелые металлы, которые могут как прямо, так и опосредованно влиять на ценоз микроорганизмов. Отсутствие выраженного воздействия аэрополлютантов на развитие изучаемых групп микроорганизмов в почвах промышленных зон города можно объяснить свойствами самих почв (низкое содержание макро-

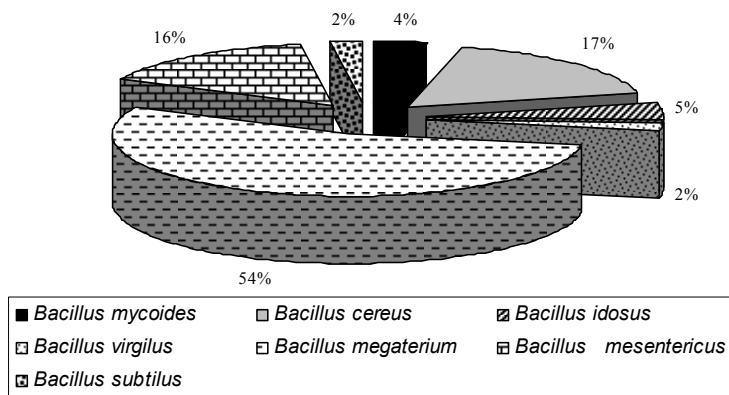
и микроэлементов, промывной водный режим, низкие показатели рН и пр.): поступаемые соединения могут сорбироваться различными компонентами почвы и становиться малодоступными для микробов (Deraolis, Kukkonen, 1997; Zhang et al., 1998). Возможна также и протекторная роль самого микробиоценоза. Так, согласно С. Г. Скугоревой (2005), при постепенном поступлении аэрополлютантов в почву в микробных клетках происходит синтез металлосвязывающих белков, способных нейтрализовывать негативное влияние тяжелых металлов. Кроме того, активность почвенных ферментов может быть лимитирована недостатком микроэлементов в почвообразующей породе. В этой связи биоаккумуляция элементов антропогенного характера в почве может привести к возрастанию ферментативной активности, а следовательно, к увеличению скорости минерализационных процессов.

**Таблица 5.2.3.** Диапазон изменения численности микроорганизмов в почвах промышленной зоны города, тыс. КОЕ/г почвы  
**Table 5.2.3.** Range of variation of microorganism numbers in soils of urban industrial areas, 1000 CFU/g of soil

Глубина отбора, см	Бактерии			Актиномицеты	Микромицеты	КЦМ
	использующие N-NH <sub>2</sub>		потребляющие N-NO <sub>3</sub>			
	общее	спорообразующие				
«Тяжбуммаш»						
0–5 см	<u>11 172–18 122*</u> 14 036	<u>2483–5412</u> 3824	<u>9842–23 616</u> 19 000	<u>1476–2384</u> 1907	<u>160–406</u> 288	<u>18–23</u> 20
5–10 см	<u>5949–29 835</u> 20 917	<u>1610–5890</u> 4233	<u>3780–126 560</u> 54 090	<u>420–5876</u> 2925	<u>74–186</u> 136	<u>19–31</u> 23
«Авангард»						
0–5 см	<u>16 480–52 480</u> 34 259	<u>3584–8624</u> 5893	<u>24 624–72 688</u> 43 104	<u>1536–4104</u> 30 009	<u>192–752</u> 623	<u>3–52</u> 28
5–10 см	<u>8280–27 090</u> 17 790	<u>1610–5160</u> 3857	<u>5676–27 360</u> 13 695	<u>920–5280</u> 2239	<u>65–204</u> 148	<u>3–23</u> 11
«ОТЗ»						
0–5 см	<u>3510–11 520</u> 9225	<u>944–9684</u> 3603	<u>2106–10 560</u> 6007	<u>0–2004</u> 1459	<u>234–850</u> 505	<u>0–7</u> 5
5–10 см	<u>1776–6104</u> 4001	<u>1110–1696</u> 1472	<u>1272–8214</u> 5754	<u>424–4884</u> 1860	<u>113–533</u> 276	<u>1–15</u> 7
Средние данные						
0–5 см	<u>9225–64 259</u> 19 173	<u>3824–5893</u> 4440	<u>6007–43 104</u> 22 704	<u>1459–3009</u> 2125	<u>288–623</u> 472	<u>5–28</u> 18
5–10 см	<u>4001–20 917</u> 14 236	<u>1472–4233</u> 3187	<u>5754–54 090</u> 24513	<u>1860–2925</u> 2341	<u>136–276</u> 186	<u>7–23</u> 14

Подтверждением этого является возрастание численности микроорганизмов биодеструктивного блока в исследуемых почвах (табл. 5.2.3). Было обнаружено расширение диапазона численности бактерий, утилизирующих органические и минеральные соединения азота.

Также выявили довольно широкий спектр индикаторных спорообразующих форм микроорганизмов, среди которых доминировали *Bacillus megaterium*, *B. mesentericus*, *B. cereus* (рис. 5.2.4). При этом необходимо отметить, что данные бактерии, способные потреблять органические и минеральные соединения азота, являются характерными для биотопов с интенсивными процессами нитрификации.



**Рис. 5.2.4.** Таксономический состав спорообразующих сапротрофных бактерий

**Fig. 5.2.4.** Taxonomic composition of spore-forming saprotrophic bacteria

На фоне урбанистического пресса было обнаружено изменение пространственного распределения микроорганизмов в отдельных микролокусах почв (табл. 5.2.4). Расширение диапазона численности микроорганизмов ассоциации эвтрофов и гидролитиков свидетельствует о переходе микробного сообщества в зону затяжного стресса (Гузов и др., 1985). Для данной зоны толерантности характерно такое изменение конкурентных взаимоотношений между отдельными его членами, которое в целом может ослабить устойчивость микробного

сообщества к антропогенному воздействию. Это ускоряет процесс их перехода в новую адаптивную зону – зону репрессии, реабилитация микробиологических свойств почв в которой требует использования микробиотой дополнительных энергетических эквивалентов.

**Таблица 5.2.4.** Структура микробного сообщества минеральных горизонтов почв промышленных зон города, тыс./см<sup>3</sup> почвы  
**Table 5.2.4.** Structure of the microbial community in the mineral horizon of soils in urban industrial areas, 1000/cm<sup>3</sup> of soil

Эвтрофная ассоциация			Гидролитическая ассоциация		
Бактерии, использующие		Микроми- цеты	Спорообразу- ющие	Актиноми- цеты	КЦМ
N-NH <sub>2</sub>	N-NH <sub>4</sub>				
«Тяжбуммаш»					
<u>8269–25 622</u> 18 457	<u>5254–30 334</u> 42 237	<u>103–177</u> 128	<u>2238–5596</u> 3859	<u>584–4231</u> 2390	<u>19–26</u> 23
«Авангард»					
<u>5465–28 980</u> 22 137	<u>5313–44 050</u> 18 687	<u>77–328</u> 173	<u>1063–7728</u> 4960	<u>607–8501</u> 3239	<u>4–37</u> 15
«ОТЗ»					
<u>1788–2389</u> 2124	<u>623–3713</u> 2259	<u>52–126</u> 80	<u>570–831</u> 742	<u>208–550</u> 388	<u>3–5</u> 4
Средние данные					
14 239 ± 10 652	21 061 ± 20 095	127 ± 47	3187 ± 2188	2006 ± 47	14 ± 10

Стимулирующий эффект аэрополлютанты оказывали на целлюлозолитическую активность почв. Выявили возрастание скорости минерализации углеродсодержащих полимеров. При этом отмечали высокую численность как микромицетов, интенсивно образующих внеклеточные пигменты и выделяющих слизь, так и миксобактериальных форм из рода *Cytophaga* и эпизодически встречаемых вибрионов из рода *Cellivibrio*. Последние, как известно, являются достаточно требовательными к азотному питанию. При этом необходимо подчеркнуть, что комплекс аэробных целлюлозоразрушающих микроорганизмов, воздействуя на углеводы, создает элементы минерального питания для других членов микробного сообщества (Бухтояров и др., 2004). Согласно данным предыдущих исследований, трансформация органического вещества в почвах города происходит недостаточно глубоко, поэтому и плодородие почв низкое (Медведева, 2010; Федорец,

Медведева, 2005). В этой связи необходимо проводить мероприятия по оптимизации состояния микробиоты, чтобы активизировать микробиоту биодеструктивного комплекса. Это позволило бы повысить продукционную способность фитоценоза, его пластичность, в целом упругость БГЦ к негативному воздействию урбанистического пресса.

Таким образом, структурно-функциональная организация микробоценоза почв рекреационной и промышленной зон г. Петрозаводска определяется как свойствами самих микробных сообществ почв, так и уровнем антропогенного воздействия. Увеличение численности микроорганизмов важнейших эколого-трофических групп, изменение их состава и функциональной активности на фоне урбанистического пресса свидетельствуют о затяжном характере нарушений в микробном сообществе. Вместе с тем микробные сообщества зоны рекреации и промышленной зоны не выходят за рамки диапазона численности, характерного для почв ненарушенных экосистем, и на данном этапе загрязнения почв элиминирования отдельных групп микроорганизмов не происходило. Возможно, это связано с тем, что аккумуляция аэрополлютантов в почве происходила постепенно, что позволило микробоценозу адаптироваться к новым условиям педосреды, сформировать иной пул микроорганизмов. Полученные результаты о структуре и составе микробного сообщества почв города могут свидетельствовать о его антропогенной сукцессии и переходе в адаптивную зону стресса. При этом хорошо прослеживается зависимость пороговой чувствительности микроорганизмов к урбанистическому прессу от их систематического положения. Микроорганизмы исследуемых почв по степени устойчивости к антропогенному воздействию можно расположить в следующем порядке возрастания: бактерии – актиномицеты – грибы. Полученные данные согласуются с общетеоретическими представлениями о функционировании различных ассоциаций микроорганизмов в почве (Звягинцев, 1987; Марфенина, 2001; Полянская и др., 1995): более высоким порогом чувствительности к антропогенному воздействию обладают прокариоты, низким – грибы. Вместе с тем для более объективной оценки этих изменений необходимо исследование активности ключевых ферментов круговорота элементов-биогенов, комплексный анализ биологической активности почв г. Петрозаводска.

## **Глава 6. ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ ВЫРУБОК КАРЕЛИИ**

### **Chapter 6. HEAVY METALS IN SOILS OF FELLED SITES IN KARELIA**

В связи с интенсивным освоением лесных ресурсов, которое сопровождается возрастанием антропогенной нагрузки, происходит нарушение динамического равновесия в биогеоценозах. Рубки можно отнести к основным антропогенным факторам, которые изменяют характер взаимодействия между почвой и растительностью, влияют на процесс почвообразования (Зябченко, 1984). При заготовке и вывозе древесины в результате воздействия тяжелой техники катастрофически меняется растительный покров и, как следствие, изменяются многие свойства и гидротермический режим почв.

Антропогенная трансформация почв наиболее отчетливо проявляется в их верхних горизонтах. Она связана с механическими нарушениями и перемешиванием верхних (20–40 см) горизонтов почв при рубках и особенно при трелевке, корчевании пней, заложении канав для посадки саженцев.

Цель исследования: выявить закономерности накопления тяжелых металлов (Cd, Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Mn) в естественных почвах и вырубках, образовавшихся в результате рубки сосновых лесов.

Природные особенности Карелии с ее умеренно холодным климатом и преобладанием почвообразующих пород легкого механического состава обусловили широкое распространение элювиально-иллювиального процесса почвообразования (Морозова, 1991, 1999). Резкой смены типов почв при продвижении с севера на юг не наблюдается, тем не менее в почвенном покрове северотаежной и среднетаежной подзон имеются некоторые различия.

Известно, что сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) отличается приуроченностью к широкому спектру местообитаний с различными эдафическими условиями. Наиболее типичными являются почвы легкого механического состава, чаще песчаные, но встречаются и супесчаные с двучленным строением профиля – это поверхностно-подзолистые и подзолы (Ведрова, 1980; Морозова, Лазарева, 1979; Переверзев, 1992).

В ходе полевых исследований были заложены пробные площади, выполнено морфологическое описание почв, из каждого генетического горизонта отбирались образцы для химического анализа.

Определение валового содержания тяжелых металлов в почвах проводилось методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии в лаборатории коллективного пользования Института леса КарНЦ РАН.

Коэффициент концентрации содержания элементов в генетических горизонтах рассчитан по формуле (Перельман, 1999):

$$K_c = C/C_\phi,$$

где  $K_c$  – коэффициент концентрации,  $C$  – содержание элемента в исследуемом горизонте,  $C_\phi$  – среднее фоновое его содержание (Федорец и др., 2008).

Для характеристики воздействия группы элементов был рассчитан суммарный показатель загрязнения (Сает, 1990):

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1),$$

где  $n$  – число учитываемых элементов.

#### Почвы северной тайги

Исследования проводились на территории Калевальского района в сосняках брусничных разного возраста. Основное различие исследуемых объектов заключается в возрасте древостоя, который возобновился после концентрированной рубки. Были изучены подзолы и поверхностно-подзолистые песчаные иллювиально-железистые почвы, которые сформировались на песчаных озерных, водно-ледниковых и моренных отложениях. Морфологическое строение профиля следующее:  $A_0$ - $A_2$ - $B_1$ - $B_2$ - $BC$ - $C$ . Мощность лесной подстилки на данных участках колеблется от 3 до 9 см (табл. 6.1). Гранулометрический состав почв варьирует от тонкозернистых до крупнозернистых песков.



**Таблица 6.1.** Морфологическое строение почв вырубок  
**Table 6.1.** Morphological structure of soils in felled sites

Тип леса	Мощность горизонта, см						Мощность профиля, см
	A0	A2	Bf	B2	BC	C	
Сосняк брусничный, 140 лет	9	2	30	–	–	–	60
Сосняк брусничный, 100 лет	3	4	14	20	27	25	100
Сосняк брусничный, 60 лет	7	7	30	–	–	–	60
Сосняк брусничный, 40 лет	9	1	25	–	–	–	50
Сосняк брусничный, 25 лет	5	20	26	30	–	–	80
Березняк, 13 лет	7	15	24	32	28	–	91

Почвы сосновых насаждений сильнокислые,  $pH_{KCl}$  в верхней части профиля составляет 2,7–3,3 (табл. 6.2), с глубиной кислотность снижается до 4,4–4,9, в почве березняка кислотность наименьшая –  $pH$  5,2. Гидролитическая кислотность в почвах варьирует в широких пределах, в лесной подстилке – от 86 до 150 мг-экв./100г, в минеральных горизонтах – от 2 до 7 мг-экв./100 г, самые низкие ее показатели отмечаются в березняке (18,9) и в 100-летнем сосняке (16,5). Наиболее насыщены основаниями почвы березняка – 82 %, наименьшие показатели степени насыщенности основаниями в почвах сосняков 40, 60 и 140 лет.

**Таблица 6.2.** Химические показатели почв вырубок  
**Table 6.2.** Chemical parameters of soils in felled sites

Тип леса	Лесная подстилка					
	Минеральный подподстилочный горизонт					
	$pH_{KCl}$	ГК	S	V, %	N	гумус
		мг-экв./100г			% к почве	
Сосняк брусничный, 140 лет	<u>4,2</u> 4,4	<u>102,4</u> 4,9	Следы	Следы	<u>1,7</u> 0,1	<u>84,2</u> 1,6
Сосняк брусничный, 100 лет	<u>3,2</u> 3,0	<u>85,4</u> 7,4	<u>24,4</u> 1,6	<u>22,2</u> 17,9	<u>1,1</u> 0,3	<u>68,8</u> 2,4
Сосняк брусничный, 60 лет	<u>4,1</u> 4,4	<u>137,4</u> 3,6	Следы	Следы	<u>1,8</u> 0,02	<u>51,3</u> 0,8
Сосняк брусничный, 40 лет	<u>4,1</u> 4,4	<u>130,2</u> 8,2	Следы	Следы	<u>1,9</u> 0,04	<u>50,5</u> 0,5
Сосняк брусничный, 25 лет	<u>2,7</u> 3,0	<u>151,8</u> 4,2	<u>48,6</u> 0,6	<u>24,2</u> 12,5	<u>1,1</u> 0,2	<u>75,6</u> 0,3
Березняк, 13 лет	<u>4,4</u> 4,8	<u>86,4</u> 3,9	<u>Следы</u> 10,2	<u>Следы</u> 6,5	<u>1,3</u> 0,1	<u>70,2</u> 0,5

Содержание в подстилке общего азота составляет 1,1–1,9 %, гумуса – 70,2–84,2 %, в подподстилочном горизонте азота в некоторых случаях выявлено менее 0,1 %, а гумуса – 0,3 %. Самые высокие показатели содержания органического вещества в лесных подстилках 40- и 60-летних сосняков.

Количество тяжелых металлов в верхних горизонтах исследуемых почв не превышает ПДК (ГН 2.1.7.2041-06) и ОДК (ГН 2.1.7.2042-06) (табл. 6.3).

**Таблица 6.3.** Содержание тяжелых металлов в почвах вырубок, мг/кг  
**Table 6.3.** Heavy metal levels in soils in felled sites, ppm

Тип леса	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn
Органогенный горизонт								
Березняк, 13 лет	0,7	6,4	1,5	19,5	2,7	2,6	11,2	74,0
Сосняк брусничный, 25 лет	0,1	Не опр.	4,1	46,9	4,1	4,6	41,0	76,7
Сосняк брусничный, 40 лет	0,8	10,5	4,5	38,3	9,2	5,0	14,7	90,5
Сосняк брусничный, 60 лет	0,6	7,6	1,7	14,5	3,2	2,8	17,0	77,1
Сосняк брусничный, 100 лет	0,1	4,5	4,7	40,9	4,1	4,1	41,0	Не опр.
Сосняк брусничный, 140 лет	0,6	6,9	2,5	24,6	2,3	2,3	12,8	65,7
Минеральный подподстилочный горизонт								
Березняк, 13 лет	0,9	10,2	4,6	40,3	8,7	5,1	14,4	108,8
Сосняк брусничный, 25 лет	0,2	15,4	5,9	35,5	20,5	7,4	41,1	206,5
Сосняк брусничный, 40 лет	0,9	9,4	3,8	32,9	10,0	5,8	14,9	102,8
Сосняк брусничный, 60 лет	0,6	7,7	3,3	31,8	7,3	4,3	14,0	112,3
Сосняк брусничный, 100 лет	0,1	3,8	37,6	41,1	20,5	38,4	40,9	245,5
Сосняк брусничный, 140 лет	0,7	6,1	32,9	32,9	6,9	3,6	11,7	85,1

При сравнении накопления ТМ в лесных подстилках сосняков различного возраста, сформировавшихся после вырубki древостоев, отмечено, что свинец, медь, никель, цинк, кобальт и хром накапливаются в 25- и 40-летних, что свидетельствует об их аэротехногенном поступлении. Относительно накопления марганца и кадмия каких-либо четких закономерностей в связи с возрастом сосняков не выявлено. В подстилке березняка валовое содержание микроэлементов довольно низкое. Как известно, накопление микроэлементов в минеральных горизонтах почв в основном зависит от содержания их в материнских породах. Наши исследования показали отсутствие тесной связи аккумуляции микроэлементов в профиле почв с возрастом древостоя.

Самые высокие коэффициенты концентрирования ТМ (табл. 6.4) в органогенных горизонтах всех исследованных почв отмечены для кобальта (2,78 мг/кг) и хрома (4,10). Лесные подстилки березняка по сравнению с сосновыми насаждениями отличаются одними из самых низких коэффициентов концентрации тяжелых металлов (кроме кадмия). Что касается минеральных горизонтов, следует отметить высокие показатели концентрирования меди, цинка и марганца в почвах спелых сосновых насаждений.

**Таблица 6.4.** Коэффициенты концентрации и суммарный показатель загрязнения почв тяжелыми металлами

**Table 6.4.** Heavy metal coefficients of concentration and the integrated heavy metal pollution index  $Z_c$  of soils

Тип леса	$K_c$								$Z_c$
	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	
Органогенный горизонт									
Березняк, 13 лет	1,35	0,27	0,04	0,29	0,38	1,44	1,12	0,22	1,91
Сосняк брусничный, 25 лет	0,25	—	0,11	0,69	0,57	2,56	4,10	0,23	3,92
Сосняк брусничный, 40 лет	1,54	0,45	0,12	0,57	1,28	2,78	1,47	0,27	3,64
Сосняк брусничный, 60 лет	1,15	0,33	0,04	0,21	0,44	1,56	1,70	0,23	2,41
Сосняк брусничный, 100 лет	0,19	0,19	0,12	0,61	0,57	2,28	4,10	0,85	3,31
Сосняк брусничный, 140 лет	1,15	0,30	0,07	0,36	0,32	1,28	1,28	0,20	1,71
Минеральный подподстилочный горизонт									
Березняк, 13 лет	1,21	0,65	0,25	1,08	0,32	0,44	0,30	0,39	—
Сосняк брусничный, 25 лет	0,31	0,99	0,32	0,95	0,74	0,63	0,87	0,73	—
Сосняк брусничный, 40 лет	1,29	0,60	0,20	0,88	0,36	0,50	0,32	0,36	—
Сосняк брусничный, 60 лет	0,79	0,49	0,18	0,85	0,27	0,37	0,30	0,40	—
Сосняк брусничный, 100 лет	0,14	0,24	2,03	1,10	0,74	3,31	0,86	0,87	3,91
Сосняк брусничный, 140 лет	0,93	0,39	1,78	0,88	0,25	0,31	0,25	0,30	1,59

Коэффициент суммарного загрязнения  $Z_c$  лесной подстилки 25-, 40- и 100-летних сосняков находится в интервале от 3,31 до 3,92, что выше, чем в почвах остальных насаждений. В минеральных горизонтах почв спелых сосняков наблюдаются более высокие показатели коэффициента  $Z_c$  (1,59 и 3,91) по сравнению с другими участками.

Формулы накопления ТМ в верхних почвенных горизонтах свидетельствуют о том, что в лесных подстилках насаждений накапливаются, в основном, кобальт и хром (табл. 6.5).

**Таблица 6.5.** Формулы накопления тяжелых металлов в верхних почвенных горизонтах

**Table 6.5.** Formulae of heavy metal accumulation in topsoil

Тип леса	Горизонт	
	Лесная подстилка	Минеральный подподстилочный горизонт
Березняк, 13 лет	Co <sub>1,4</sub> -Cd <sub>1,4</sub> -Cr <sub>1,1</sub> -Ni <sub>0,4</sub> -Zn <sub>0,3</sub> -Pb <sub>0,3</sub>	Cd <sub>1,2</sub> -Zn <sub>1,1</sub> -Pb <sub>0,7</sub> -Co <sub>0,4</sub> -Mn <sub>0,4</sub> -Ni <sub>0,3</sub> -Cr <sub>0,3</sub> -Cu <sub>0,3</sub>
Сосняк брусничный, 25 лет	Cr <sub>4,1</sub> -Co <sub>2,6</sub> -Zn <sub>0,7</sub> -Ni <sub>0,6</sub> -Cd <sub>0,3</sub> -Mn <sub>0,2</sub> -Cu <sub>0,1</sub>	Pb <sub>1,0</sub> -Zn <sub>0,9</sub> -Cr <sub>0,9</sub> -Ni <sub>0,7</sub> -Mn <sub>0,7</sub> -Co <sub>0,6</sub> -Cu <sub>0,3</sub> -Cd <sub>0,3</sub>
Сосняк брусничный, 40 лет	Co <sub>2,8</sub> -Cd <sub>1,5</sub> -Cr <sub>1,5</sub> -Zn <sub>0,6</sub> -Pb <sub>0,5</sub> -Mn <sub>0,3</sub>	Cd <sub>1,3</sub> -Zn <sub>0,9</sub> -Pb <sub>0,6</sub> -Co <sub>0,5</sub> -Mn <sub>0,4</sub> -Ni <sub>0,4</sub> -Cr <sub>0,3</sub> -Cu <sub>0,2</sub>
Сосняк брусничный, 60 лет	Cr <sub>1,7</sub> -Co <sub>1,6</sub> -Cd <sub>1,2</sub> -Ni <sub>0,4</sub> -Pb <sub>0,3</sub> -Mn <sub>0,2</sub>	Zn <sub>0,9</sub> -Cd <sub>0,8</sub> -Pb <sub>0,5</sub> -Mn <sub>0,4</sub> -Co <sub>0,4</sub> -Cr <sub>0,3</sub> -Ni <sub>0,3</sub> -Cu <sub>0,2</sub>
Сосняк брусничный, 100 лет	Cr <sub>4,1</sub> -Co <sub>2,3</sub> -Mn <sub>0,9</sub> -Zn <sub>0,6</sub> -Ni <sub>0,6</sub> -Cd <sub>0,2</sub> -Pb <sub>0,2</sub> -Cu <sub>0,1</sub>	Co <sub>3,3</sub> -Cu <sub>2,2</sub> -Zn <sub>1,1</sub> -Mn <sub>0,9</sub> -Cr <sub>0,9</sub> -Ni <sub>0,7</sub> -Pb <sub>0,2</sub> -Cd <sub>0,1</sub>
Сосняк брусничный, 140 лет	Cr <sub>1,3</sub> -Co <sub>1,3</sub> -Cd <sub>1,2</sub> -Pb <sub>0,3</sub> -Ni <sub>0,3</sub> -Mn <sub>0,2</sub>	Cu <sub>1,8</sub> -Cd <sub>0,9</sub> -Zn <sub>0,9</sub> -Pb <sub>0,4</sub> -Co <sub>0,3</sub> -Mn <sub>0,3</sub> -Ni <sub>0,2</sub> -Cr <sub>0,2</sub>

**Таблица 6.6.** Взаимосвязь кислотно-щелочных свойств и содержания микроэлементов в почве, r (n = 3, p ≤ 0,05)

**Table 6.6.** Correlations between acid-base properties and trace element content in soils, r (n = 3, p ≤ 0.05)

Тип леса	Показатель	Fe	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn
Сосняк брусничный, 140 лет	pH <sub>KCl</sub>	-0,5	-0,5	-0,8	-0,2	-0,4	-0,2	-0,3	-0,8	-0,2
	ГК	-0,1	-0,1	0,4	-0,4	-0,2	-0,4	-0,3	0,3	-0,4
	pH <sub>KCl</sub>	0,7	—	0,4	0,4	0,4	0,9	0,6	0,8	0,8
Сосняк брусничный, 100 лет	ГК	0,4	—	-1,0	0,7	0,6	—	0,5	0,2	0,1
	S	0,4	—	-1,0	0,7	0,7	0,1	0,6	0,3	0,2
	V	0,7	—	0,3	0,4	0,5	0,9	0,6	0,8	0,9
Сосняк брусничный, 60 лет	pH <sub>KCl</sub>	0,9	0,3	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0	0,3	0,9
	ГК	-0,3	0,5	—	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,4
Сосняк брусничный, 40 лет	pH <sub>KCl</sub>	0,5	0,7	0,3	-0,9	-0,1	1,0	1,0	0,8	1,0
	ГК	0,3	-1,0	0,5	1,0	0,8	-0,5	-0,7	-0,2	-0,4
Сосняк брусничный, 25 лет	pH <sub>KCl</sub>	1,0	0,2	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0
	ГК	-0,6	-0,9	-1,0	-0,3	-0,5	-0,8	-0,4	-0,1	-0,7
	S	-0,5	-0,9	-1,0	-0,3	-0,5	-0,7	-0,4	-0,01	-0,7
	V	0,9	-0,4	—	1,0	0,9	0,7	0,9	1,0	0,7
Березняк, 15 лет	pH <sub>KCl</sub>	0,8	0,4	1,0	0,3	1,0	0,4	0,4	0,9	0,2
	ГК	-1,0	-0,9	-0,7	-0,8	-0,7	-0,9	-0,9	-0,5	-0,7

В результате исследования установили тесную взаимосвязь содержания Fe, Pb, Zn и Cr в 50-сантиметровом почвенном слое и показателя pH (табл. 6.6). Установлена корреляционная взаимосвязь суммы обменных оснований и концентрации в почве Fe, Cu, Zn, Ni, Co, Cr и Mn, с увеличением возраста древостоя эта зависимость снижается. По мере увеличения возраста древостоя изменяется и набор микроэлементов, с которыми коррелирует показатель почвенной кислотности.

Наши исследования показали существенную взаимосвязь содержания органического вещества и накопления в почве Cu и Zn сосняков 40- и 100-летнего возраста (табл. 6.7). На остальных участках была выявлена слабая или обратная корреляция между этими показателями.

**Таблица 6.7.** Корреляционная зависимость содержания органического вещества и микроэлементов в почве,  $r$  ( $n = 3$ ,  $p \leq 0,05$ )

**Table 6.7.** Correlation between organic matter and trace element content in soils,  $r$  ( $n = 3$ ,  $p \leq 0.05$ )

Тип леса	Fe	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn
Сосняк брусничный, 140 лет	-0,2	-0,1	-0,4	-0,5	-0,2	-0,4	-0,3	0,2	-0,4
Сосняк брусничный, 100 лет	0,4	—	-1,0	0,7	0,7	0,1	0,5	0,3	0,2
Сосняк брусничный, 60 лет	-0,3	0,5	—	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	0,5	-0,4
Сосняк брусничный, 40 лет	0,3	-1,0	0,6	0,9	0,8	-0,5	-0,6	-0,1	-0,4
Сосняк брусничный, 25 лет	-0,5	-0,9	-1,0	-0,3	-0,5	-0,7	-0,4	-0,1	-0,7
Березняк, 15 лет	-1,0	-0,9	-0,7	-0,8	-0,7	-0,9	-0,9	-0,5	-0,7

Таким образом, установили, что количество тяжелых металлов в верхних горизонтах исследуемых почв северотаежной подзоны не превышает ПДК и ОДК. Сравнивая показатели накопления ТМ в лесных подстилках сосняков различного возраста, сформировавшихся после вырубki древостоев, отмечаем, что свинец, медь, никель, цинк, кобальт и хром в наибольшей степени накапливаются в 25- и 40-летних, что свидетельствует об их аэротехногенном поступлении, в результате отсутствия хорошо сформировавшейся сомкнутой кроны деревьев. В подстилке березняка валовое содержание микроэлементов довольно низкое. Относительно накопления марганца и кадмия в почвах каких-либо четких закономерностей в связи с возрастом сосня-

ков не выявлено. Установлена взаимосвязь показателей почвенной кислотности, суммы обменных оснований с концентрацией Fe, Cu, Zn, Ni, Co, Cr и Mn, а также количества почвенного органического вещества и концентрации меди и цинка.

### Почвы средней тайги

Исследования проводились в Государственном заповеднике «Кивач», расположенном в Кондопожском районе в сосняках черничных, пройденных рубками ухода различной интенсивности: 30%-е изреживание и сплошная вырубка. К началу исследований на вырубке сформировалось березовое насаждение 15-летнего возраста. Объектами исследований послужили подзолы песчаные иллювиально-железистые на двучленных отложениях. Территория располагается в денудационно-тектоническом грядовом с преобладанием сосновых местообитаний ландшафте (Волков и др., 1990). Морфологическое строение профиля исследуемых почв следующее: A<sub>0</sub>-A<sub>2</sub>-B<sub>f</sub>-B<sub>2</sub>-ПВ<sub>3</sub>-BC-C.

Мощность лесной подстилки этих почв составляет 3–5 см (табл. 6.8). Так как рубка древостоя проводилась без нарушения поверхности, изменений в морфологическом строении изучаемых почв не произошло.

**Таблица 6.8.** Морфологическое строение песчаных подзолов иллювиально-железистых

**Table 6.8.** Morphological structure of sandy ferric podzols

Тип леса	Мощность горизонта, см									Мощность профиля, см
	A0	A2	Bf	ПВ	ПВ3	B	BC1	BC2	C	
Сосняк черничный, 60 лет, без изреживания	4	11	23	15	12	26	20	40	20	170
Сосняк черничный, 60 лет, 30 % изреживания	5	9	17	15	15	–	20	25	55	160
Березняк, 15 лет	3	8	15	20	20	–	19	23	47	160

Почвы сильнокислые, рН<sub>KCl</sub> в верхней части профиля 2,8–3,5; с глубиной кислотность снижается до 4,5–5,0 (табл. 6.9). Значительного варьирования показателей рН почвенной среды на различных пробных площадях не отмечено. В почвах нарушенных участков показателя

тель гидролитической кислотности выше в подзолистых горизонтах и составляет 10,5 (сосняк) и 20,7 мг-экв./100 г (березняк). Наибольшее накопление обменных оснований выявлено в почвах березняка.

**Таблица 6.9.** Химические показатели почв в сосняках и березняке  
**Table 6.9.** Chemical parameters of soils in pine and birch stands

Тип леса	Лесная подстилка					
	Минеральный подподстилочный горизонт					
	pH <sub>KCl</sub>	ГК мг-экс./100 г	S	V, %	N	гумус
Сосняк черничный, 60 лет, без изреживания	<u>2,8</u> 3,0	<u>15,4</u> 13,0	<u>0,7</u> 1,4	<u>Следы</u> 0,1	<u>2,5</u> 0,02	<u>85,9</u> 0,7
Сосняк черничный, 60 лет, 30 % изреживания	<u>2,8</u> 2,6	<u>8,0</u> 10,5	<u>0,1</u> Следы	Следы	<u>2,6</u> 0,03	<u>88,3</u> 1,0
Березняк, 15 лет	<u>3,3</u> 3,0	<u>8,9</u> 20,7	<u>0,7</u> 0,9	<u>0,1</u> Следы	<u>1,7</u> 0,1	<u>59,8</u> 2,1

Содержание общего азота в лесной подстилке составляет 1,7–2,6 %, гумуса – 59,8–85,9 %, в подподстилочном горизонте содержание гумуса и азота низкое – 0,02–0,1; 0,7–2,1% соответственно. В березняке отмечается самое низкое содержание органического вещества в лесной подстилке и наибольшее – в минеральном подподстилочном горизонте.

Концентрация тяжелых металлов в органогенных горизонтах исследуемых участков не превышает ПДК и ОДК, а также региональный фоновый уровень (Федорец и др., 2008). В органогенном горизонте почв накопление ТМ выше, чем в минеральных (табл. 6.10).

**Таблица 6.10.** Содержание тяжелых металлов в верхних горизонтах почв сосняков и березового насаждения, мг/кг

**Table 6.10.** Heavy metal content in the topsoil of pine and birch stands, ppm

Тип древостоя	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn
Органогенный горизонт								
Березняк, 15 лет	0,7	11,9	5,1	62,6	16,1	2,1	25,1	90,8
Сосняк 60 лет, 30 % изреживания	0,7	27,4	6,6	46,6	13,9	2,1	15,9	163,4
Сосняк 60 лет без изреживания	0,9	14,1	7,4	34,7	16,1	4,8	20,2	141,2
Минеральный горизонт								
Березняк, 15 лет	0,6	6,2	4,2	35,5	11,6	4,5	19,8	109,3
Сосняк 60 лет, 30 % изреживания	0,6	4,8	2,5	22,4	9,2	3,9	17,9	86,6
Сосняк 60 лет без изреживания	0,6	7,2	3,2	20,6	9,9	3,8	18,9	84,9

Известно, что лесная подстилка выполняет роль барьера на пути поступления аэротехногенных поллютантов в почву. Наиболее высокие коэффициенты концентрирования ТМ в лесных подстилках характерны для никеля, кобальта и хрома во всех исследованных насаждениях, а для свинца – в сосняке с 30%-м изреживанием древостоя. Величины коэффициентов концентрации свидетельствуют о слабой интенсивности накопления ТМ в минеральных горизонтах исследованных почв (табл. 6.11). Следует отметить, что при этом показатель суммарного загрязнения подстилок ТМ наибольший в сосняке, не пройденном изреживанием. По нашему мнению, это связано с биогенным накоплением микроэлементов в лесных подстилках и автохтонным – в минеральных горизонтах.

**Таблица 6.11.** Коэффициенты концентрации и суммарный показатель загрязнения почв тяжелыми металлами

**Table 6.11.** Heavy metal coefficients of concentration and the integrated heavy metal pollution index  $Z_c$  of soils

Возраст древостоя	$K_c$								$Z_c$
	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn	
Органогенный горизонт									
Березняк, 15 лет	1,35	0,51	0,13	0,93	2,24	1,17	2,51	0,28	3,71
Сосняк, 30 % изреживания	1,35	1,18	0,17	0,69	1,93	1,17	1,59	0,50	2,41
Сосняк без изреживания	1,73	0,61	0,20	0,51	2,24	2,67	2,02	0,43	4,78
Минеральный горизонт									
Березняк, 15 лет	0,86	0,40	0,23	0,95	0,42	0,38	0,42	0,39	—
Сосняк, 30 % изреживания	0,86	0,31	0,13	0,60	0,33	0,34	0,38	0,31	—
Сосняк без изреживания	0,86	0,46	0,17	0,55	0,36	0,32	0,40	0,30	—

Формулы накопления (табл. 6.12) демонстрируют высокое содержание никеля, кобальта и хрома в органогенных горизонтах изучаемых почв на всех пробных площадях. В минеральных горизонтах накапливаются цинк и кадмий.

Установлена тесная взаимосвязь показателя рН в слое почвы 50 см с содержанием железа и кобальта (табл. 6.13). В 15-летнем березняке почвенная кислотность тесно связана также с кадмием и медью, а в сосняке, пройденном рубкой ухода, – с кадмием. С другими кислотно-щелочными показателями почв содержание микроэлементов имеет обратную корреляционную связь.



**Таблица 6.12.** Формулы накопления тяжелых металлов в верхних горизонтах почв вырубок

**Table 6.12.** Formulae of heavy metal accumulation in the topsoil of felled sites

Возраст древостоя	Горизонт	
	органогенный	минеральный
Березняк, 15 лет	$\text{Co}_{1,2}\text{-Cr}_{2,5}\text{-Ni}_{2,2}\text{-Cd}_{1,4}\text{-Zn}_{1,0}\text{-Pb}_{0,5}\text{-Mn}_{0,3}\text{-Cu}_{0,1}$	$\text{Zn}_{1,0}\text{-Cd}_{0,9}\text{-Ni}_{0,4}\text{-Cr}_{0,4}\text{-Pb}_{0,4}\text{-Mn}_{0,4}\text{-Co}_{0,4}\text{-Cu}_{0,2}$
Сосняк, 30 % изреживания	$\text{Ni}_{2,0}\text{-Cr}_{1,6}\text{-Cd}_{1,4}\text{-Pb}_{1,2}\text{-Co}_{1,2}\text{-Zn}_{0,7}\text{-Mn}_{0,5}\text{-Cu}_{0,2}$	$\text{Cd}_{0,9}\text{-Zn}_{0,6}\text{-Cr}_{0,4}\text{-Co}_{0,3}\text{-Ni}_{0,3}\text{-Pb}_{0,3}\text{-Mn}_{0,3}\text{-Cu}_{0,1}$
Сосняк естественный	$\text{Co}_{2,7}\text{-Ni}_{2,2}\text{-Cr}_{2,0}\text{-Cd}_{1,7}\text{-Pb}_{0,5}\text{-Zn}_{0,6}\text{-Mn}_{0,4}\text{-Cu}_{0,2}$	$\text{Cd}_{0,9}\text{-Zn}_{0,6}\text{-Pb}_{0,5}\text{-Cr}_{0,4}\text{-Ni}_{0,4}\text{-Co}_{0,3}\text{-Mn}_{0,3}\text{-Cu}_{0,2}$

**Таблица 6.13.** Коэффициенты корреляции кислотно-щелочных свойств и содержания микроэлементов в 50-см слое почв, r (n = 9; 8; 6, p ≤ 0,05)

**Table 6.13.** Coefficients of correlation of acid-base properties and trace element content in a 50-cm soil layer, r (n = 9; 8; 6, p ≤ 0.05)

Тип леса	Показатель	Fe	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn
Сосняк черничный, 60 лет	pH <sub>KCl</sub>	0,7	0,3	-0,6	0,4	0,2	0,5	0,8	-0,2	0,4
	ГК	-0,7	-0,7	0,5	-0,6	0,0	-0,3	-0,7	0,6	-0,6
	S	-0,1	0,2	-0,6	-0,2	-0,7	-0,3	-	-0,9	-0,2
	V	0,6	0,1	-0,2	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4	0,6
Сосняк черничный, 60 лет (30 % изреживания)	pH <sub>KCl</sub>	0,8	0,8	-0,3	0,3	-	0,4	0,8	0,4	0,4
	ГК	-0,4	-0,6	-0,1	-0,3	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	-0,5
	S	0,5	0,6	-0,4	0,3	0,1	0,2	0,5	-	-0,1
	V	0,4	0,4	-0,2	0,5	0,1	0,2	0,5	0,5	0,1
Березняк, 15 лет	pH <sub>KCl</sub>	0,6	-0,2	0,1	0,3	-0,5	0,2	0,6	-0,4	0,7
	ГК	-0,7	-0,6	-0,6	-0,8	-	-0,8	-0,7	-0,1	-0,8
	S	0,5	0,4	-0,1	0,7	-0,7	-0,1	0,5	-0,7	0,4
	V	0,7	0,7	-	0,9	-0,6	0,2	0,8	-0,5	0,7

Значительное влияние оказывает органическое вещество на содержание свинца в лесных подстилках всех вариантов опыта (табл. 6.14). В березняке оно также влияет на содержание цинка и хрома, с остальными элементами взаимосвязь незначительная.

**Таблица 6.14.** Коэффициенты корреляции содержания органического вещества и микроэлементов в 50-см слое почв,  $r$  ( $n = 9; 8; 6$ ,  $p \leq 0,05$ )

**Table 6.14.** Coefficients of correlation of organic matter content and trace elements in a 50-cm soil layer,  $r$  ( $n = 9; 8; 6$ ,  $p \leq 0.05$ )

Тип леса	Fe	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn
Сосняк черничный, 60 лет	-0,3	0,2	1,0	–	0,5	0,3	-0,2	0,5	–
Сосняк черничный, 60 лет, 30 % изреживания	-0,6	-0,2	1,0	–	0,6	0,2	-0,6	-0,6	0,4
Березняк, 15 лет	-0,6	0,6	0,8	–	1,0	0,3	-0,6	0,9	-0,4

Таким образом, было установлено, что количество тяжелых металлов в верхних горизонтах исследуемых почв в среднетаежной подзоне, так же как в почвах северной тайги, не превышает предельно допустимые концентрации. Сравнивая накопление ТМ в лесных подстилках сосняков, не нарушенных рубкой, с их концентрацией в почвах в древостое с 30%-м изреживанием и в березняке, сформировавшемся после сплошной вырубki соснового древостоя, установили, что в органогенных горизонтах почв накопление ТМ выше, чем в минеральных. Причем степень хозяйственного воздействия существенного влияния не оказала.

Во всех исследованных насаждениях в лесных подстилках в наибольшей степени накапливаются никель, кобальт и хром, а в сосняке с 30%-м изреживанием древостоя – свинец.

Расчет формул накопления тяжелых металлов в почвах показал накопление никеля, кобальта и хрома в органогенных горизонтах изучаемых почв на всех пробных площадях. Для минеральных горизонтов характерна аккумуляция цинка и кадмия.

Выявлена прямая взаимосвязь показателя рН в 50-сантиметровом слое почв с содержанием железа и кобальта, в 15-летнем березняке – еще и с кадмием, медью, а в сосняке, пройденном рубкой ухода, – с кадмием. Тесная прямая взаимосвязь накопления свинца в почвах установлена с количеством в них органического вещества.

## **Глава 7. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ПОЧВ КАРЕЛИИ**

### **Chapter 7. HEAVY METAL CONTAMINATION IN SOILS OF KARELIA**

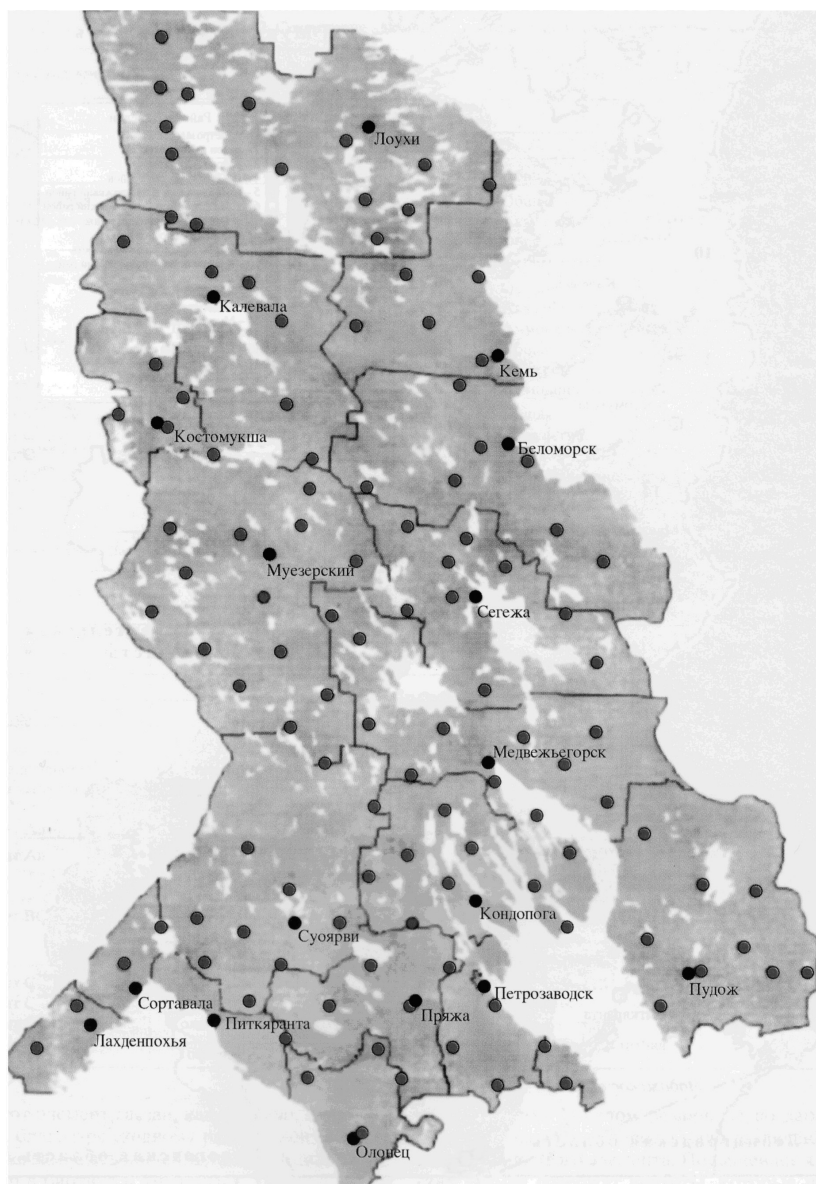
#### **7. 1. Содержание тяжелых металлов в почвах Карелии: средние региональные данные**

##### **7.1. Heavy metal levels in soils of Karelia: regional averages**

Институтом леса Карельского НЦ РАН в рамках проекта «Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe» в 1990–2000-х гг. проведено изучение аккумуляции тяжелых металлов в лесных подстилках и минеральных горизонтах почв на территории Республики Карелия. По данным о накоплении тяжелых металлов в лесных подстилках можно судить об источниках, ареалах, степени загрязнения окружающей среды, а также выявить основные вещества-загрязнители. Исследование химического состава минеральных подстилочных горизонтов и почвообразующих пород дает возможность отделить поступающие из атмосферы поллютанты от металлов, содержащихся в породах.

Целью работы явилось определение уровня автохтонного и аллохтонного накопления тяжелых металлов в почвах на территории Республики Карелия.

Отбор образцов проводили на пробных площадях биоиндикационной сетки, охватывающей всю территорию республики (рис. 7.1.1). Точки отбора располагались на расстоянии не ближе 300 м от автомагистралей, населенных пунктов и объектов промышленности и, по меньшей мере, в 100 м от второстепенных дорог и жилых построек. Расстояние от любого источника загрязнения фиксировалось. Составляли один смешанный образец из 5–10 индивидуальных, собранных равномерно с площади  $50 \times 50 \text{ м}^2$ .



**Рис. 7.1.1.** Карта пробных площадей  
**Fig. 7.1.1.** Map of sample plots

Образцы лесных подстилок высушивали при температуре +90 °С до постоянного веса, минеральных горизонтов – при +105 °С. После высушивания образцы пропускали через сито с диаметром ячейки 2 мм. Образцы лесных подстилок по две параллельные серии сжигали методом мокрого озоления в автоклаве в азотной кислоте. Далее на атомно-абсорбционном спектрофотометре определяли следующие элементы: Cd, Pb, Cr, Ni, Co, Zn, Cu, Mn, Fe. Минеральные образцы почв подвергали сухому озолению с последующим спектральным определением содержания тяжелых металлов на спектрографе PGS-2 с плоской дифракционной решеткой.

На основе полученных данных построены карты-схемы накопления тяжелых металлов в лесных подстилках и минеральных подподстилочных горизонтах исследуемых почв в программе MapInfo 8.5. Расчеты шкал были составлены по гистограммам частоты встречаемости тех или иных концентраций элементов в указанных почвенных горизонтах.

### **Кадмий (Cadmium)**

Среднее содержание кадмия в лесных подстилках Карелии составляет 0,50 мг/кг, в минеральных горизонтах – 1,03 (табл. 7.1.1). Небольшие участки повышенного накопления кадмия в минеральных горизонтах выявлены в центральном и южном районах региона, а также на побережье Белого моря (рис. 7.1.2). Однако ни в одном из указанных районов содержание кадмия не достигает предельно допустимой концентрации. Распределение частоты встречаемости содержания кадмия в органогенных и минеральных горизонтах почв Карелии приведено на рис. 7.1.3 и 7.1.4.

**Таблица 7.1.1.** Валовое содержание кадмия в почвах Карелии, мг/кг

**Table 7.1.1.** Total content of cadmium in soils of Karelia, ppm

Горизонт	min	max	среднее	медиана
О	0,10	0,98	0,50	0,53
Е	0,40	3,00	1,03	1,00

Лесная подстилка / Forest litter

Минеральный подпочвенный горизонт / Upper mineral horizon

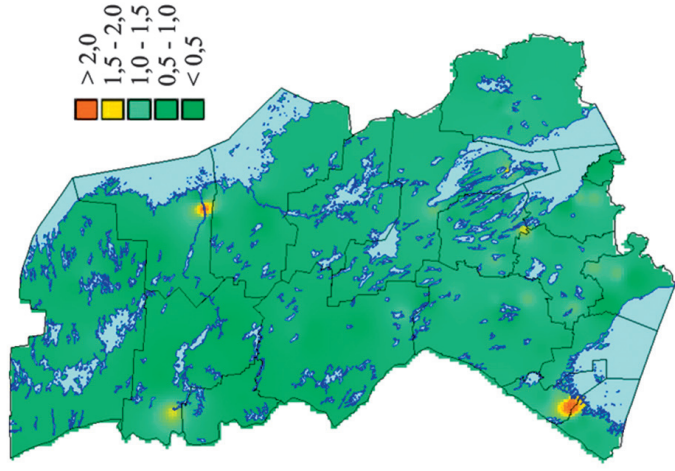
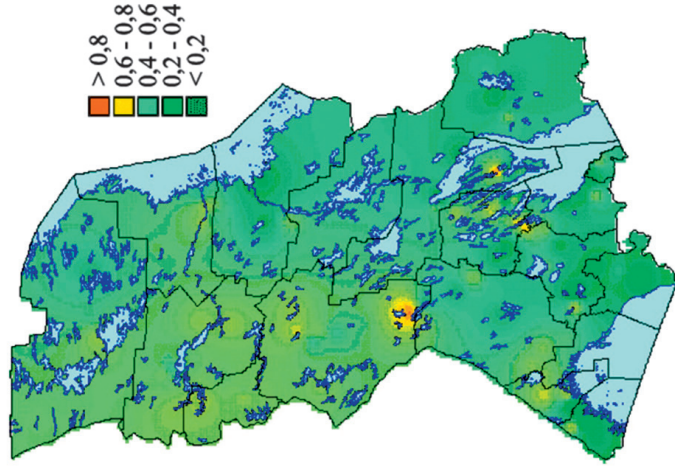
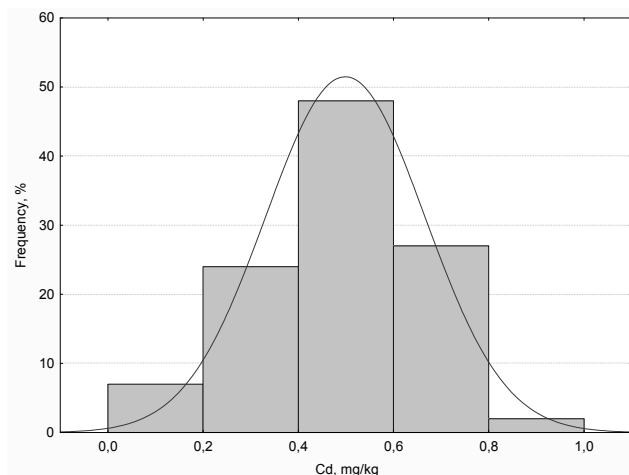


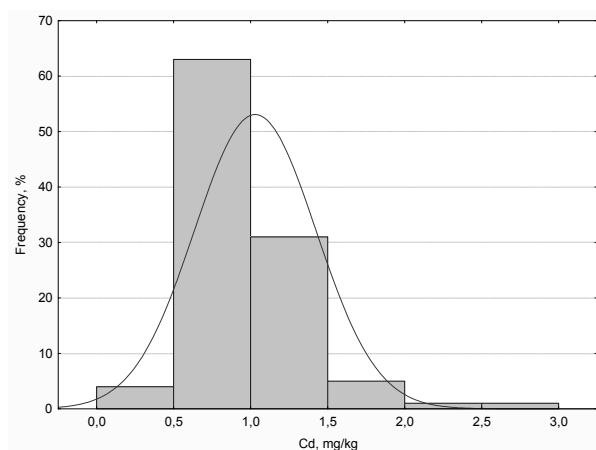
Рис. 7.1.2. Картохемы содержания кадмия в верхних горизонтах почв Карелии

Fig. 7.1.2. Content of cadmium in upper soil horizons of Karelia



**Рис. 7.1.3.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций кадмия для лесных подстилок

**Fig. 7.1.3.** Histogram of the frequency of occurrence of cadmium concentrations in forest litters



**Рис. 7.1.4.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций кадмия для минеральных горизонтов

**Fig. 7.1.4.** Histogram of the frequency of occurrence of cadmium concentrations in mineral horizons

Лесная подстилка / Forest litter

Минеральный подподстильный горизонт / Upper mineral horizon

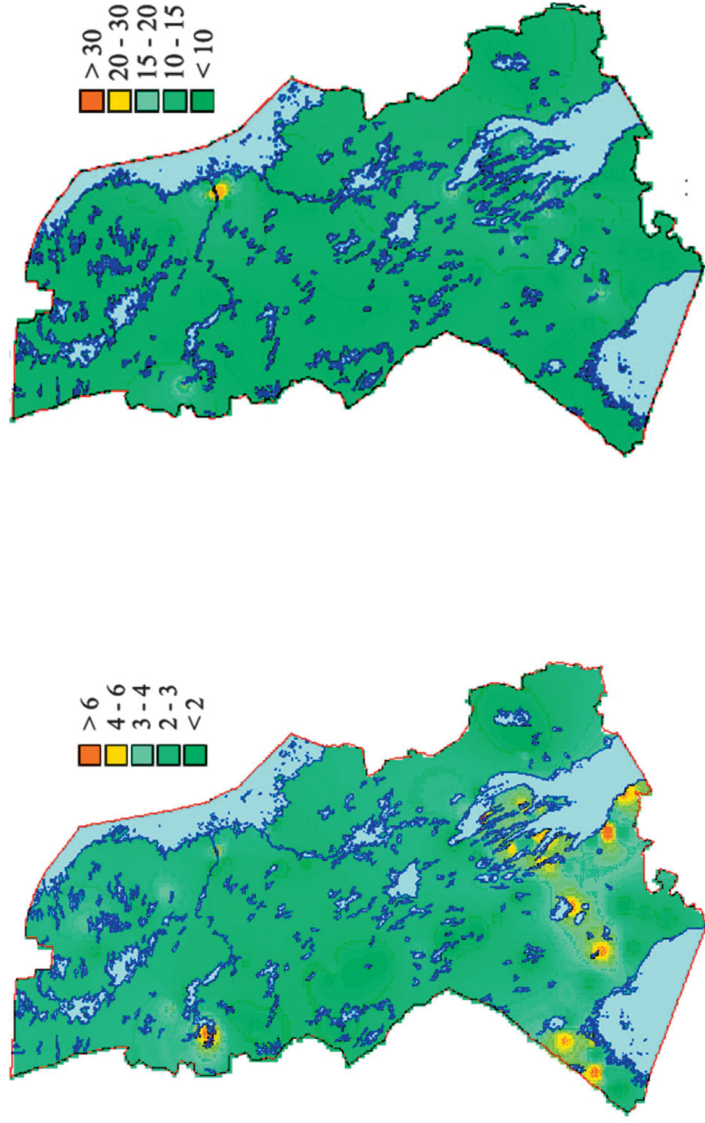


Рис. 7.1.5. Картошемы содержания кобальта в верхних горизонтах почв Карелии

Fig. 7.1.5. Content of cobalt in upper soil horizons of Karelia



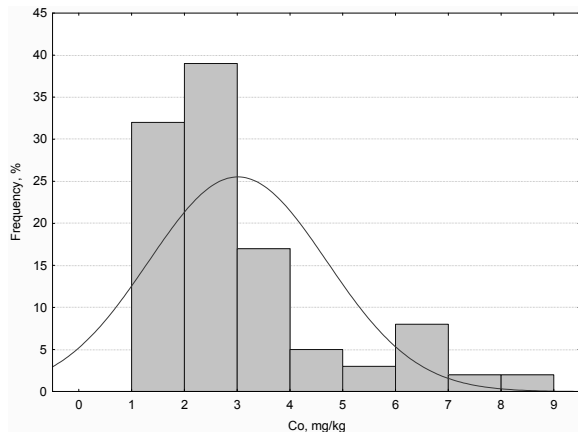
### Кобальт (Cobalt)

В лесных подстилках среднее содержание кобальта составляет 3 мг/кг (табл. 7.1.2), лишь в северо-западной части, на юге и юго-западе Карелии отмечены отдельные участки повышенного накопления кобальта (более 6 мг/кг). В минеральных горизонтах содержание кобальта составляет 12 мг/кг, однако в некоторых частях региона отмечено его накопление, превышающее фоновые значения, но не достигающее ПДК (рис. 7.1.5). На рис. 7.1.6 и 7.1.7 приведена частота встречаемости различных концентраций кобальта в лесных подстилках и минеральных горизонтах почв Карелии.

**Таблица 7.1.2.** Валовое содержание кобальта в почвах Карелии, мг/кг

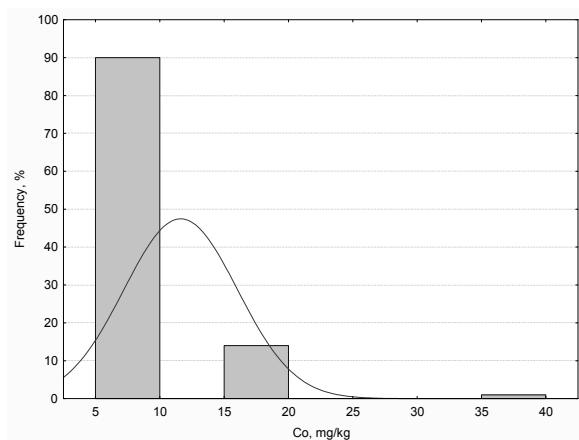
**Table 7.1.2.** Total content of cobalt in soils of Karelia, ppm

Горизонт	min	max	среднее	медиана
О	1,06	8,24	3,01	2,30
Е	10	40	12	10



**Рис. 7.1.6.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций кобальта в лесных подстилках

**Fig. 7.1.6.** Histogram of the frequency of occurrence of cobalt concentrations in forest litters



**Рис. 7.1.7.** Гистограмма встречаемости концентраций кобальта в минеральных горизонтах почв

**Fig. 7.1.7.** Histogram of the frequency of occurrence of cobalt concentrations in mineral horizons

### Хром (Chromium)

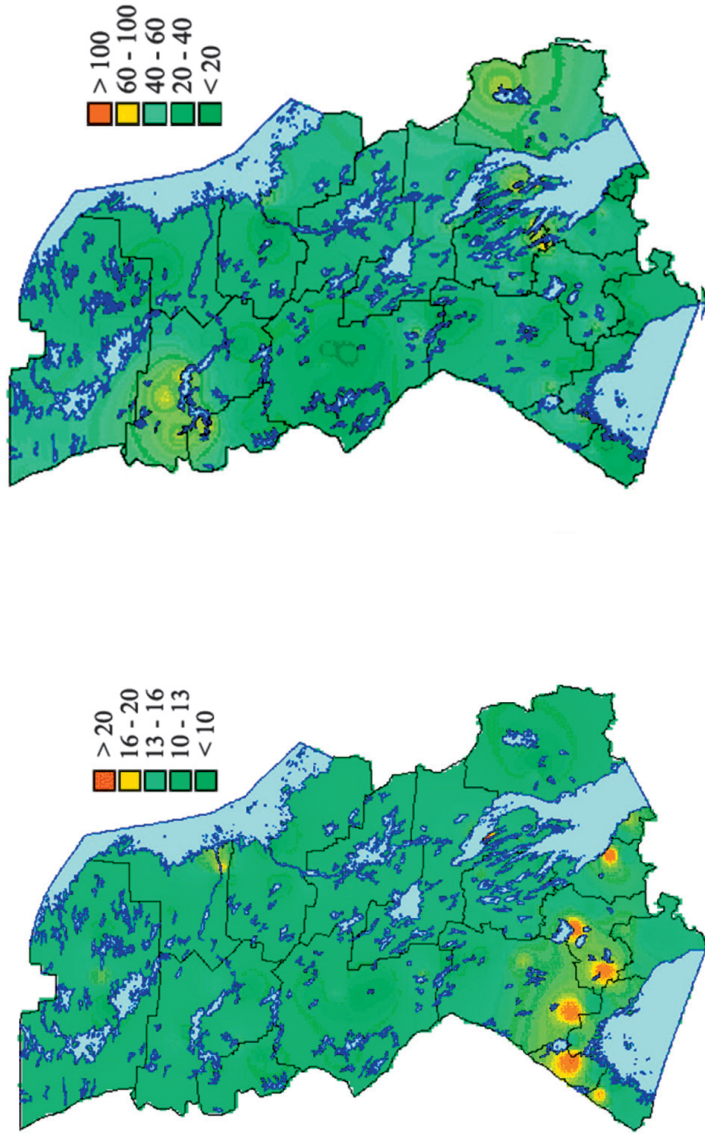
Как показали исследования, в лесных подстилках накопление хрома невысокое, ни на одной из пробных площадей содержание этого элемента не превышает ПДК. В органогенном горизонте оно в среднем составляет 13,8 мг/кг (табл. 7.1.3), выше фоновых значений накопление хрома отмечено в районе Приладожья и вблизи городов Петрозаводска и Кеми. В минеральных горизонтах почв среднее содержание хрома – 47 мг/кг. В районе Заонежья, в Пудожском районе (Аганозерское месторождение), севернее Костомукши установлено повышенное содержание хрома (около 60–100 мг/кг) (рис. 7.1.8), что свидетельствует о высоком содержании его в почвообразующих породах этих территорий. Распределение частоты встречаемости содержания хрома в органогенных и минеральных горизонтах почв Карелии приведено на рис. 7.1.9 и 7.1.10.

**Таблица 7.1.3.** Валовое содержание хрома в почвах Карелии, мг/кг  
**Table 7.1.3.** Total content of chromium in soils of Karelia, ppm

Горизонт	min	max	среднее	медиана
О	8,7	25,0	13,8	13,5
Е	10	120	47	40

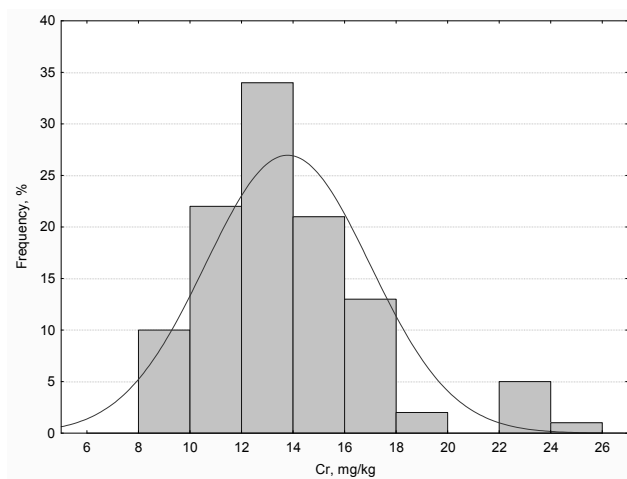
Лесная подстилка / Forest litter

Минеральный подподстильный горизонт / Upper mineral horizon



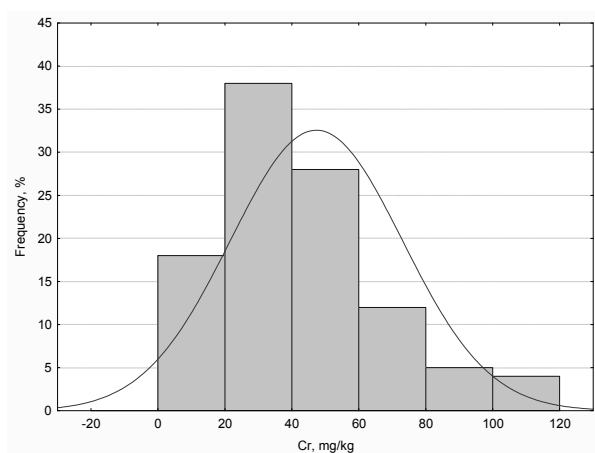
**Рис. 7.1.8.** Картошемы содержания хрома в верхних горизонтах почв Карелии

**Fig. 7.1.8.** Content of chromium in upper soil horizons of Karelia



**Рис. 7.1.9.** Гистограмма частоты встречаемости хрома в лесных подстилках

**Fig. 7.1.9.** Histogram of the frequency of occurrence of chromium concentrations in forest litters



**Рис. 7.1.10.** Гистограмма частоты встречаемости хрома в минеральных горизонтах почв

**Fig. 7.1.10.** Histogram of the frequency of occurrence of chromium concentrations in mineral horizons

Лесная подстилка / Forest litter

Минеральный подподстилочный горизонт / Upper mineral horizon

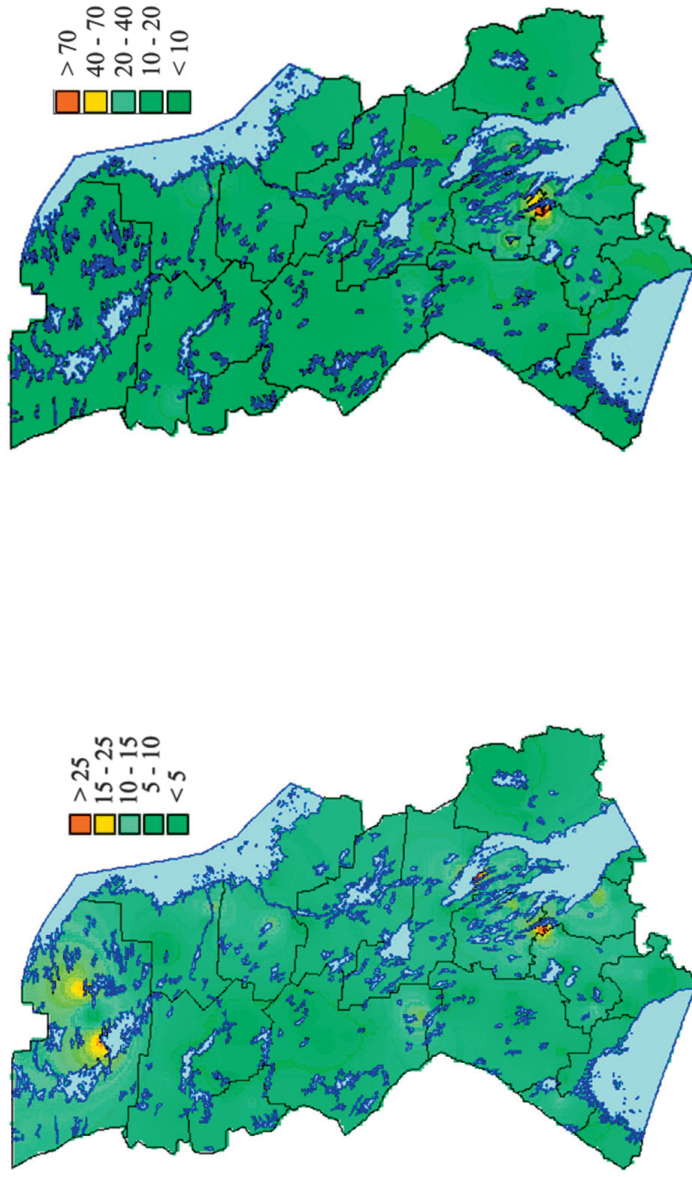


Рис. 7.1.11. Картосхемы содержания меди в верхних горизонтах почв Карелии

Fig. 7.1.11. Content of copper in upper soil horizons of Karelia

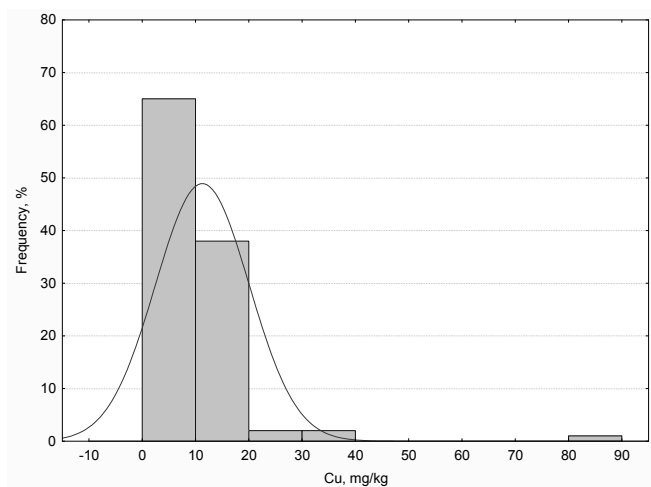
## Медь (Copper)

Повышенного содержания меди в лесных подстилках на территории Карелии не выявлено. Средние значения составляют 11,3 мг/кг (табл. 7.1.4).

В целом содержание меди в минеральных горизонтах почв довольно низкое (18 мг/кг), лишь в районе Кондопоги отмечено накопление ее в минеральных горизонтах до 1 ПДК (более 70 мг/кг) (рис. 7.1.11), что связано, возможно, с содержанием в почвообразующих породах повышенного количества меди. Частота встречаемости меди в горизонтах лесных почв приведена на рис. 7.1.12 и 7.1.13.

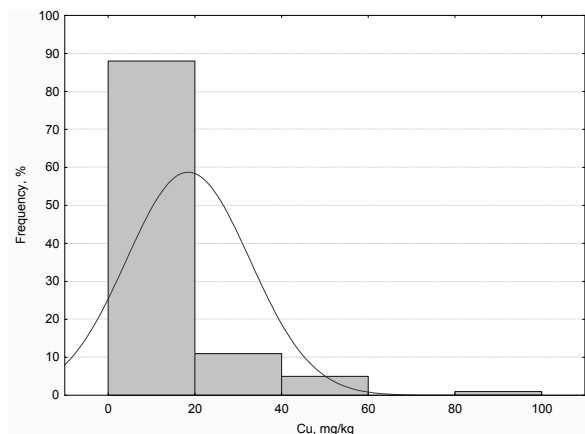
**Таблица 7.1.4.** Валовое содержание меди в почвах Карелии, мг/кг  
**Table 7.1.4.** Total content of copper in soils of Karelia, ppm

Горизонт	min	max	среднее	медиана
О	4,5	86,9	11,3	9,1
Е	10	100	18	10



**Рис. 7.1.12.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций меди в лесных подстилках

**Fig. 7.1.12.** Histogram of the frequency of occurrence of copper concentrations in forest litters



**Рис. 7.1.13.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций меди в минеральных горизонтах

**Fig. 7.1.13.** Histogram of the frequency of occurrence of copper concentrations in mineral horizons

### Железо (Iron)

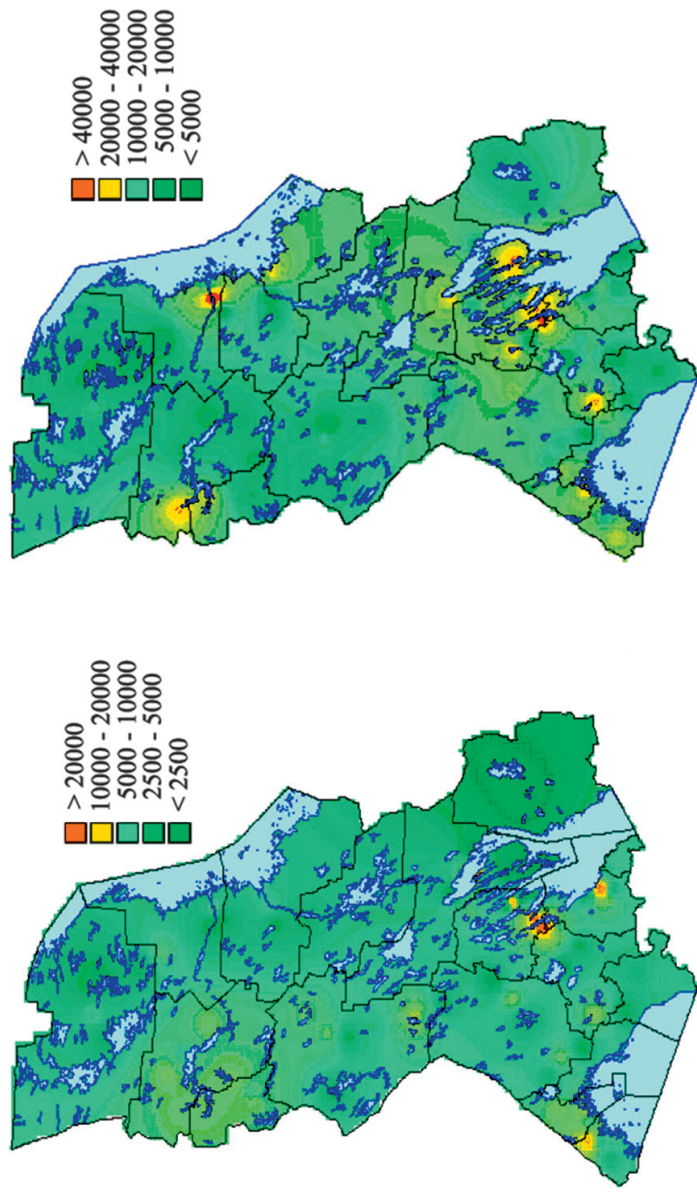
Лесные подстилки накапливают значительное количество железа, среднее значение по Карелии составляет 6817 мг/кг (табл. 7.1.5). Фоновый показатель для минеральных горизонтов находится на уровне 1,75 % (17 500 мг/кг). Самые высокие значения, превышающие фон в 3,5 раза, выявлены в Кемском и Кондопожском районах, а также в районе городов Медвежьегорска, Сортавалы. Превышение фона выявлено в районе г. Костомукши (рис. 7.1.14), что связано с наличием железорудного месторождения. На рис. 7.1.15 и 7.1.16 показано распределение частоты встречаемости содержания железа в органогенных и минеральных горизонтах почв Карелии, соответственно.

**Таблица 7.1.5.** Валовое содержание железа в почвах Карелии, мг/кг

**Table 7.1.5.** Total content of iron in soils of Karelia, ppm

Горизонт	min	max	среднее	медиана
О	134	34 200	6817	5815
Е	2600	59 000	17 505	13 600

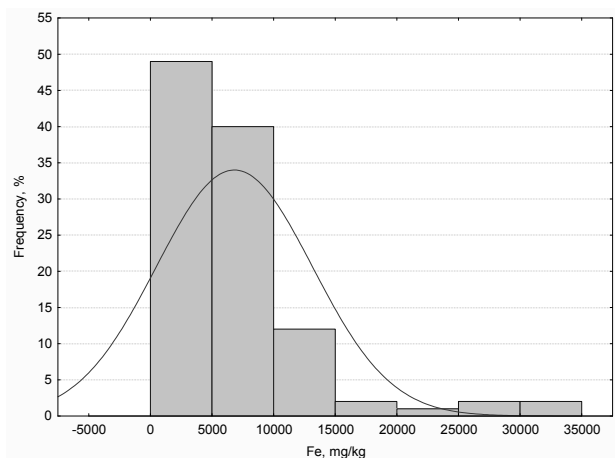
Лесная подстилка / Forest litter      Минеральный подподстильный горизонт / Upper mineral horizon



**Рис. 7.1.14.** Картошемы содержания железа в верхних горизонтах почв Карелии

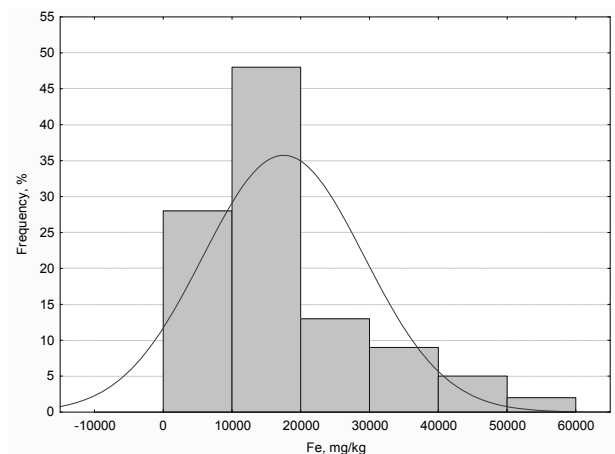
**Fig. 7.1.14.** Content of iron in upper soil horizons of Karelia





**Рис. 7.1.15.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций железа в лесных постилках

**Fig. 7.1.15.** Histogram of the frequency of occurrence of iron concentrations in forest litters



**Рис. 7.1.16.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций железа в минеральных горизонтах почв

**Fig. 7.1.16.** Histogram of the frequency of occurrence of iron concentrations in mineral horizons

Лесная подстилка / Forest litter

Минеральный подподстильный горизонт / Upper mineral horizon

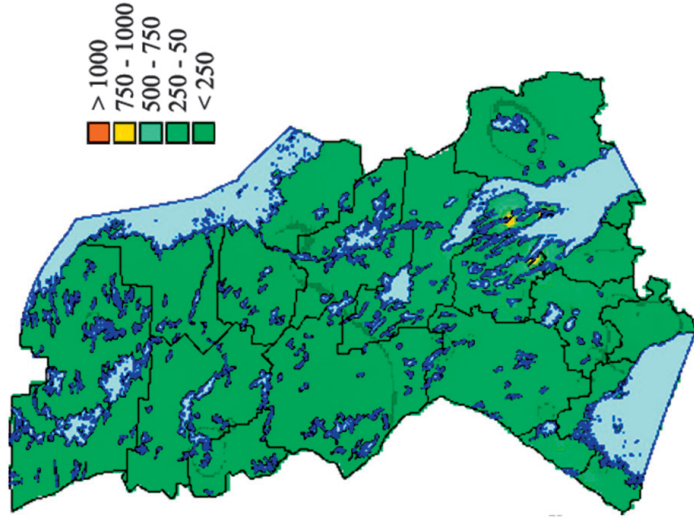
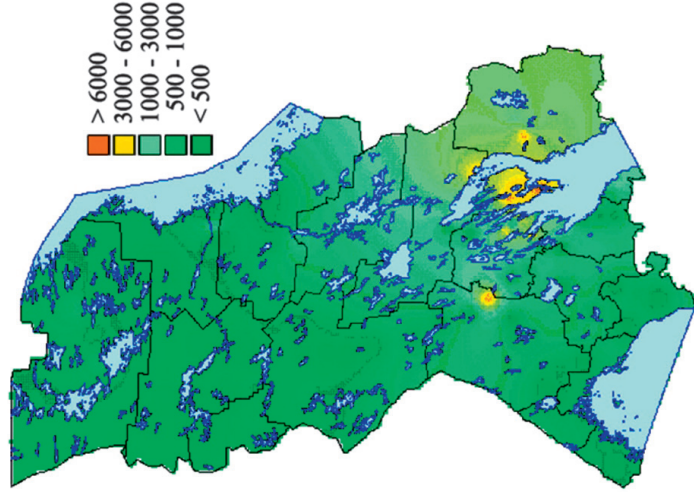


Рис. 7.1.17. Картошемы содержания марганца в верхних горизонтах почв Карелии

Fig. 7.1.17. Content of manganese in upper soil horizons of Karelia

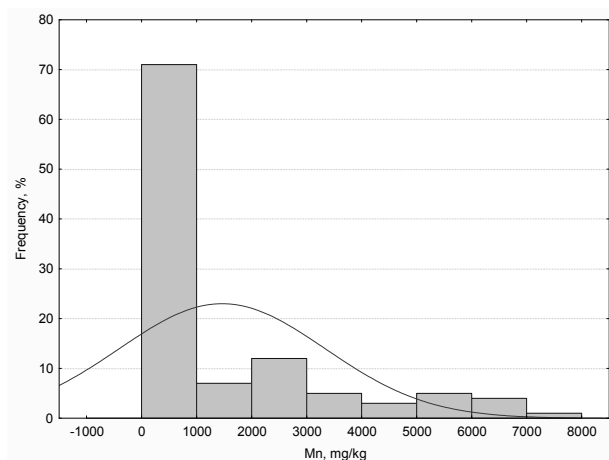
## Марганец (Manganese)

В лесных подстилках региона накапливается значительное количество марганца, а на некоторых пробных площадях значительно (в 4–5 раз) превышает средние показатели по Карелии и составляет 1,5–3 ПДК (табл. 7.1.6). В минеральных горизонтах отмечено значительно меньшее количество марганца, чем в органогенных. В Заонежье и Прионежском районе накопление марганца превышает средние значения по Карелии, однако не достигает ПДК (рис. 7.1.17). На рис. 7.1.18 и 7.1.19 приведена частота встречаемости различных концентраций марганца в лесных подстилках и минеральных горизонтах почв региона.

**Таблица 7.1.6.** Валовое содержание марганца в почвах Карелии, мг/кг

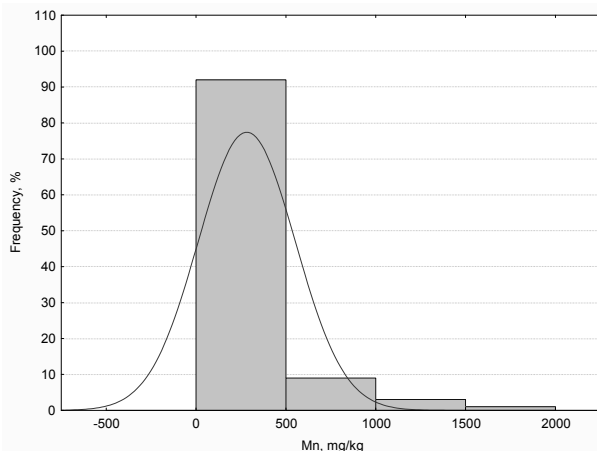
**Table 7.1.6.** Total content of manganese in soils of Karelia, ppm

Горизонт	min	max	среднее	медиана
О	64	7 300	1 465	475
Е	50	1 760	282	200



**Рис. 7.1.18.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций марганца в лесных подстилках

**Fig. 7.1.18.** Histogram of the frequency of occurrence of manganese concentrations in forest litters



**Рис. 7.1.19.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций марганца в минеральных горизонтах почв

**Fig. 7.1.19.** Histogram of the frequency of occurrence of manganese concentrations in mineral horizons

### Никель (Nickel)

В лесных подстилках количество никеля в среднем составляет 13,6 мг/кг, причем следует отметить довольно равномерное распределение содержания никеля в подстилках по всей территории республики (табл. 7.1.7). В минеральных горизонтах содержание никеля составляет в среднем 27,5 мг/кг, превышение ПДК наблюдается на севере республики, побережье Белого моря, в Заонежье и на юго-западе Карелии (рис. 7.1.20). Распределение частоты встречаемости различных концентраций никеля в горизонтах лесных почв Карелии показано на рис. 7.1.21 и 7.1.22.

**Таблица 7.1.7.** Валовое содержание никеля в почвах Карелии, мг/кг

**Table 7.1.7.** Total content of nickel in soils of Karelia, ppm

Горизонт	min	max	среднее	медиана
О	6,5	30,8	13,6	11,8
Е	10	110	27,5	20

Лесная подстилка / Forest litter

Минеральный подподстильный горизонт / Upper mineral horizon

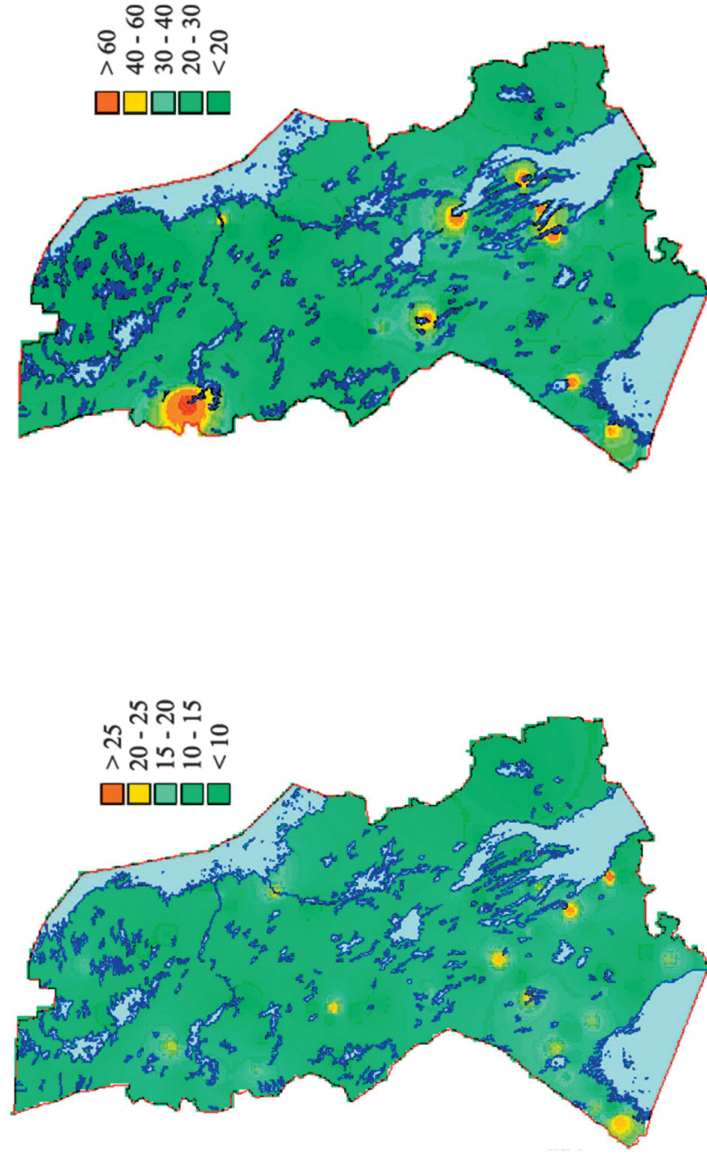
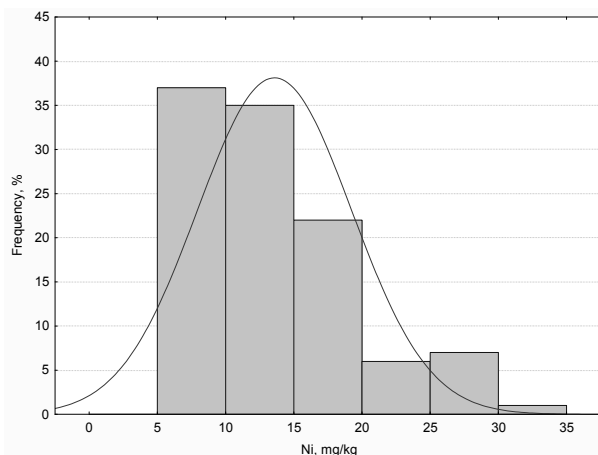


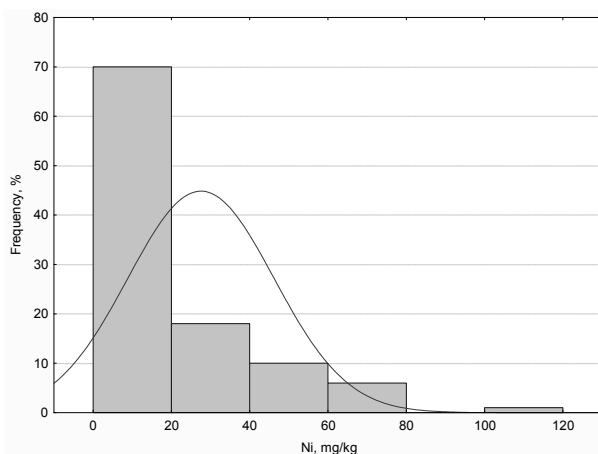
Рис. 7.1.20. Картошемы содержания никеля в верхних горизонтах почв Карелии

Fig. 7.1.20. Content of nickel in upper soil horizons of Karelia



**Рис. 7.1.21.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций никеля в лесных подстилках

**Fig. 7.1.21.** Histogram of the frequency of occurrence of nickel concentrations in forest litters



**Рис. 7.1.22.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций никеля в минеральных горизонтах

**Fig. 7.1.22.** Histogram of the frequency of occurrence of nickel concentrations in mineral horizons

Лесная подстилка / Forest litter

Минеральный подподстильный горизонт / Upper mineral horizon

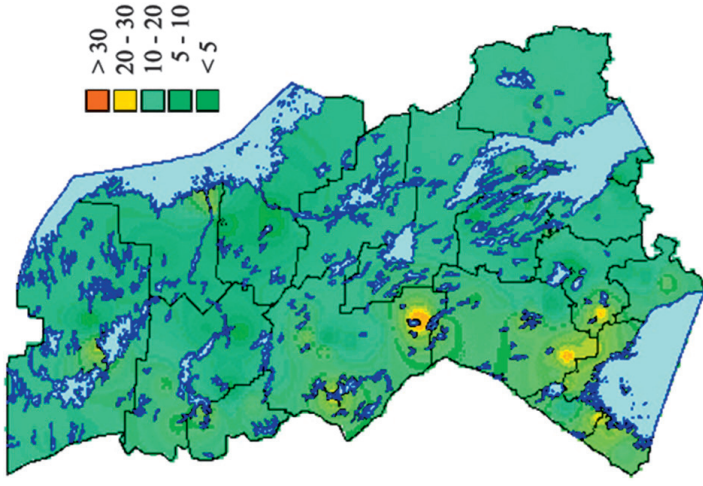
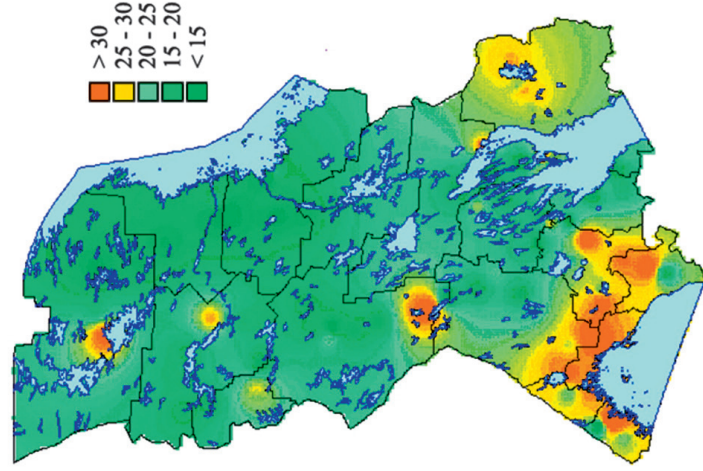


Рис. 7.1.23. Картограммы содержания свинца в верхних горизонтах почв Карелии

Fig. 7.1.23. Content of lead in upper soil horizons of Karelia

### Свинец (Lead)

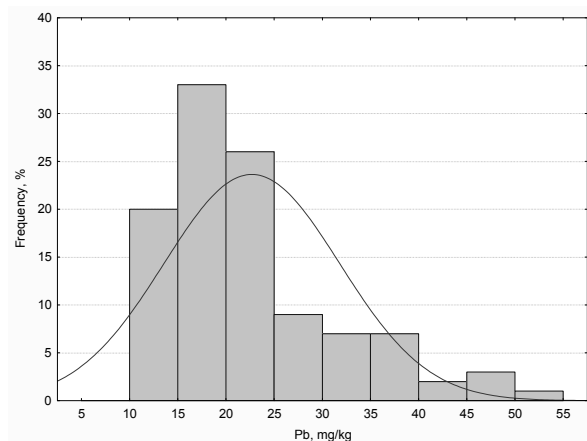
Среднее содержание свинца в лесных подстилках составляет 22,7 мг/кг (табл. 7.1.8), однако в центральной части и южных частях региона отмечены значительно большие концентрации элемента – превышение фона в 2,5, а ПДК – в 1,5 раза.

Минеральные горизонты почв характеризуются невысоким содержанием свинца, оно в среднем по Карелии составляет 15,5 мг/кг (рис. 7.1.23). Отчетливо прослеживается барьерная роль лесных подстилок, препятствующих поступлению свинца в нижележащие горизонты почв. На рис. 7.1.24 и 7.1.25 приведена частота встречаемости различных концентраций свинца в лесных подстилках и минеральных горизонтах почв Карелии.

**Таблица 7.1.8.** Валовое содержание свинца в почвах Карелии, мг/кг

**Table 7.1.8.** Total content of lead in soils of Karelia, ppm

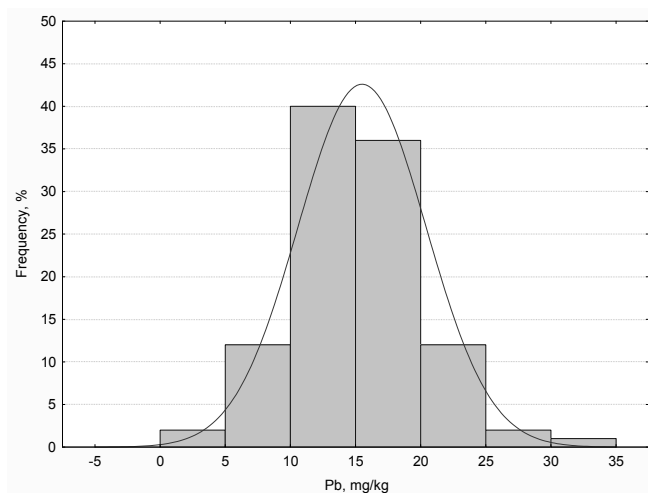
Горизонт	min	max	среднее	медиана
О	10,8	51,6	22,7	20,4
Е	0,5	31,0	15,5	15,0



**Рис. 7.1.24.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций свинца в лесных подстилках

**Fig. 7.1.24.** Histogram of the frequency of occurrence of lead concentrations in forest litters





**Рис. 7.1.25.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций свинца в минеральных горизонтах почв

**Fig. 7.1.25.** Histogram of the frequency of occurrence of lead concentrations in mineral horizons

### Цинк (Zink)

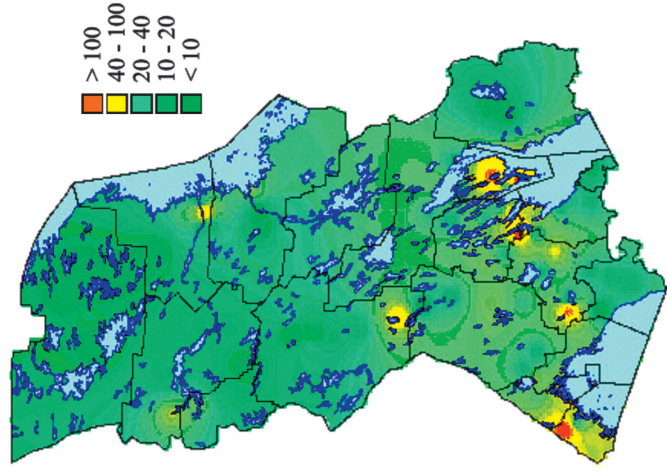
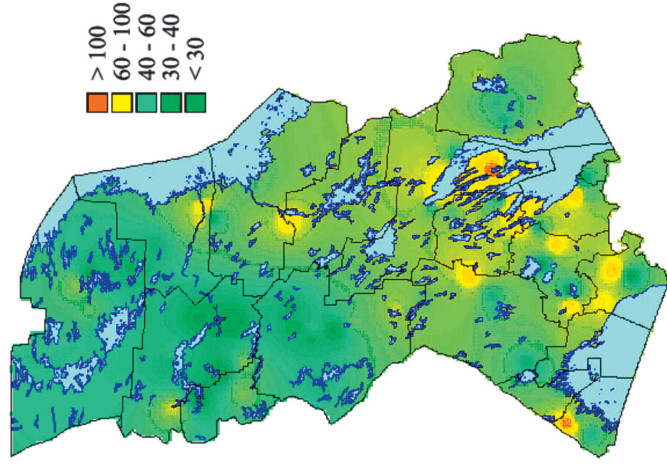
Следует отметить совпадение районов накопления цинка в лесных подстилках и минеральных горизонтах почв, однако ареалы накопления этого элемента в лесных подстилках занимают большие площади, что свидетельствует об источниках аэротехногенного загрязнения в данных районах (рис. 7.1.26). Среднее содержание цинка в лесных подстилках составляет 63,2 мг/кг и не достигает 1 ПДК (табл. 7.1.9). В минеральных горизонтах почв фоновый показатель составляет 37,2 мг/кг. Рисунки 7.1.27 и 7.1.29 отражают распределение концентраций цинка в горизонтах лесных почв по частоте встречаемости.

**Таблица 7.1.9.** Валовое содержание цинка в почвах Карелии, мг/кг  
**Table 7.1.9.** Gross content of zinc in soils of Karelia, ppm

Горизонт	min	max	среднее	медиана
О	21,2	159	63,2	59,1
Е	10	170	37,2	20,0

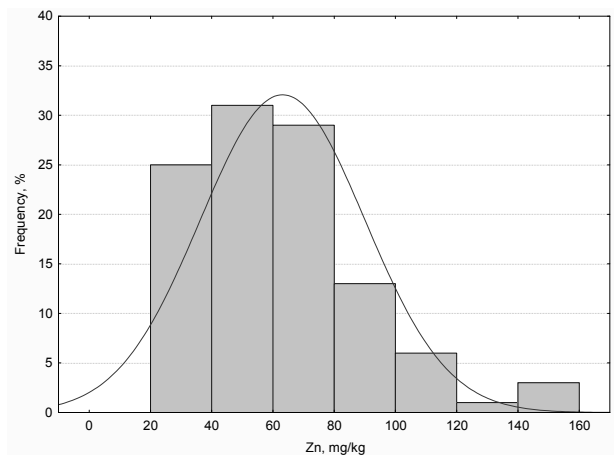
Лесная подстилка / Forest litter

Минеральный подподстильный горизонт / Upper mineral horizon



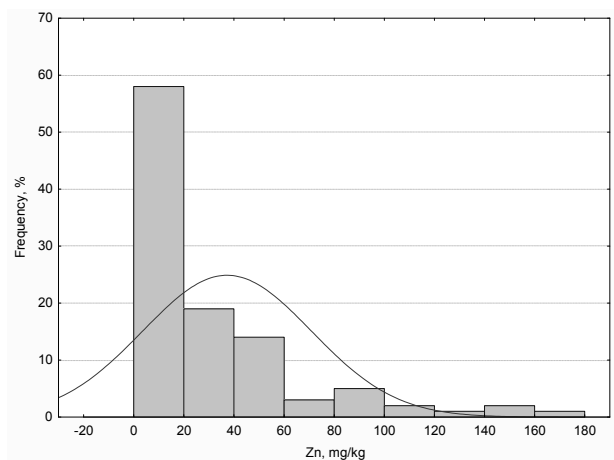
**Рис. 7.1.26.** Картошемы содержания цинка в верхних горизонтах почв Карелии

**Fig. 7.1.26.** Content of zinc in upper soil horizons of Karelia



**Рис. 7.1.27.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций цинка в лесных подстилках

**Fig. 7.1.27.** Histogram of the frequency of occurrence of zinc concentrations in forest litters



**Рис. 7.1.28.** Гистограмма частоты встречаемости концентраций цинка в минеральных горизонтах почв

**Fig. 7.1.28.** Histogram of the frequency of occurrence of zinc concentrations in mineral horizons

Проведенные исследования позволили выявить пределы колебаний и среднее содержание макро- и микроэлементов в лесных подстилках и минеральных подподстилочных горизонтах почв Карелии (табл. 7.1.10, 7.1.11), которые могут служить для оценки их плодородия, а также уровня загрязнения.

**Таблица 7.1.10.** Фоновое содержание тяжелых металлов в лесных подстилках на территории Карелии, мг/кг

**Table 7.1.10.** Background content of heavy metals in forest litters on the Karelian territory, ppm

Элемент	Пределы колебания		Среднее	Отклонение от среднего		Коэффициент вариации, %
	+	–		+	–	
Cd	0,98	0,10	0,50	0,48	0,40	33,4
Ni	30,80	6,50	13,59	17,21	7,09	41,4
Co	8,24	1,06	3,01	5,23	1,95	55,8
Pb	51,60	10,80	22,68	28,92	11,88	40,0
Cr	25,0	8,70	13,80	11,20	5,10	23,0
Cu	86,9	4,5	11,3	75,6	6,8	77,5
Mn	7300	64	1465	5835	1401	127,3
Fe	34 200	134	6817	27 383	6683	92,5
Zn	159,0	21,2	63,2	95,8	42,0	42,2

**Таблица 7. 1.11.** Фоновое содержание тяжелых металлов в минеральных подподстилочных горизонтах на территории Карелии, мг/кг

**Table 7.1.11.** Background content of heavy metals in upper mineral horizons on the Karelian territory, ppm

Элемент	Пределы колебания		Среднее	Отклонение от среднего		Коэффициент вариации, %
	+	–		+	–	
Na	28 400	2200	19 231	9169	17 031	23,6
K	20 900	1600	14 191	6709	12 591	20,3
Ni	110	10	27,5	82,5	17,5	67,6
Co	40	10	11,6	28,4	1,6	37,8
Pb	31,0	0,5	15,5	15,5	15,0	31,5
Cr	120	10	47,3	72,7	37,3	54,1
Cu	100	10	18,5	81,5	8,5	76,8
Mn	1760	50	282	1478	232	95,5
Fe	59 000	2600	17 505	41 495	14 905	66,6
Zn	170	10	37,2	132,8	27,2	90,1

Из биогенных элементов в лесных подстилках отмечено максимальное накопление меди и цинка, что обусловлено их поглощением корневой системой растений, а затем возвращением с древесным опадом. Из аэротехногенных поллютантов в подстилках накапливается свинец. Некоторые элементы (железо, марганец, кобальт) в больших концентрациях содержатся в нижних почвенных горизонтах и материнской породе. Наибольшее количество микроэлементов приурочено к минеральным горизонтам, обогащенным органическим веществом, например к иллювиально-гумусово-железистым горизонтам песчаных подзолов, или к минеральным почвенным горизонтам тяжелого механического состава (элювиально-поверхностно-глееватые почвы).

Основными источниками загрязнения территории Республики Карелия тяжелыми металлами являются промышленные центры: города Петрозаводск, Костомукша и Кондопога, а также менее крупные населенные пункты, такие как Лоухи, Медвежьегорск, Сортавала, Суоярви и другие. Загрязнение лесных подстилок чаще всего приурочено именно к этим районам. В частности, эмитенты г. Петрозаводска загрязняют окружающую среду свинцом, Костомукшский горно-обогатительный комбинат – железом и хромом, промышленность г. Кондопоги является источником целого комплекса тяжелых металлов. Источниками загрязнения окружающей среды также являются автомобильные, железнодорожные и водные магистрали.

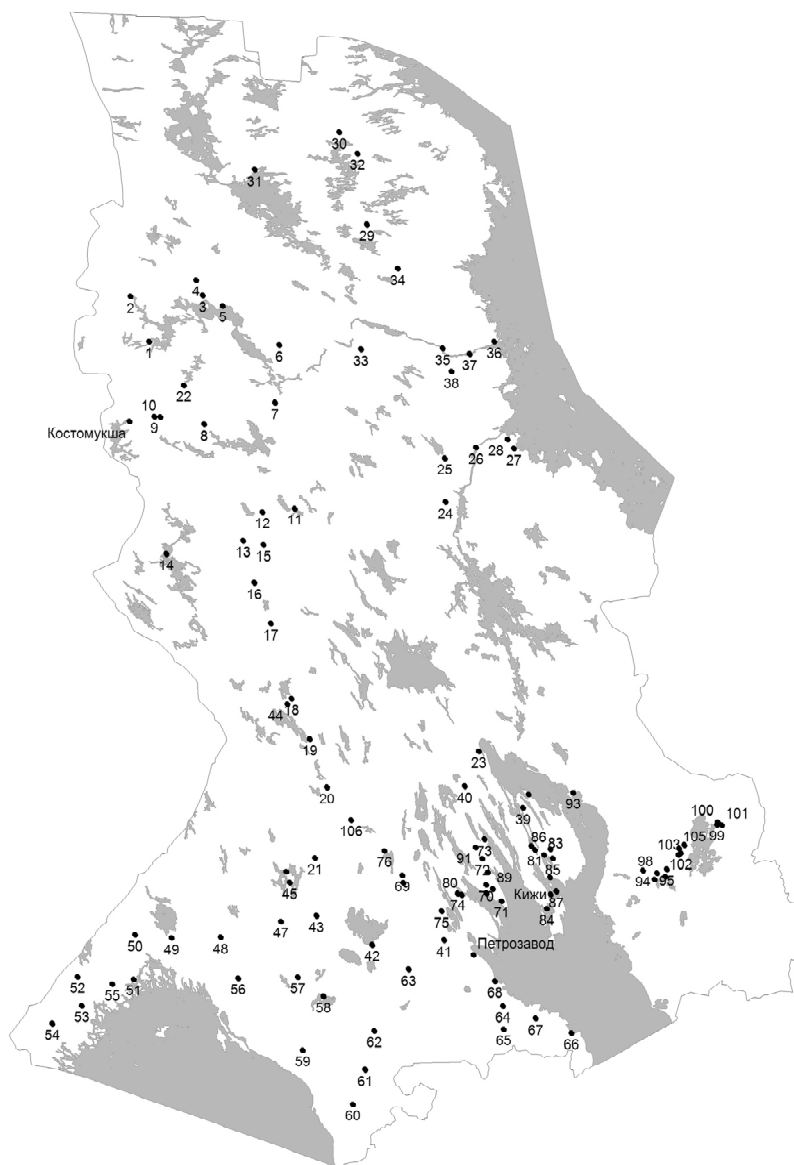
На юге и юго-западе республика подвергается аэротехногенному загрязнению цинком и кадмием промышленными предприятиями Ленинградской области, на юго-востоке и востоке – марганцем со стороны Архангельской области.

На территории республики концентрации металлов в почвах редко достигают предельно допустимых концентраций.

## **7.2. Оценка суммарного показателя загрязнения тяжелыми металлами почв Карелии**

### **7.2. Estimation of the integrated heavy metal pollution index for soils of Karelia**

Загрязнение почв тяжелыми металлами обычно происходит не одним элементом, а целым рядом, и, как указывает Д. В. Ладонин (2002), в большинстве случаев не принимается в расчет полиэлементный характер загрязнения территории. Отмечается усиление токсичности тяжелых металлов при их совместном воздействии на живые организмы. Например, совместное воздействие цинка и кадмия оказывает в несколько раз более сильное ингибирующее действие на микроорганизмы, чем при такой же концентрации каждого элемента в отдельности (Нейтрализация..., 2008; Цинк и кадмий..., 1992). Поскольку тяжелые металлы и в продуктах сгорания топлива, и в выбросах металлургической промышленности встречаются обычно в различных сочетаниях, то действие их на природу, окружающую источники загрязнения, бывает более сильным, чем предполагаемое на основании концентрации отдельных элементов (Ладонин, 2000). В связи с этим при геохимических исследованиях окружающей среды наряду с оценкой содержания отдельных химических элементов важно проводить анализ распределения ассоциаций химических элементов (Белых и др., 2006; Воронцов, 2004; Кашулина и др., 2007). Ассоциация химических элементов – группа элементов, обнаруживаемая в изучаемом объекте в количестве, отличном от критериального уровня. Таким уровнем может быть либо геохимический фон, либо другой норматив – ПДК, ОДК. Чаще всего в геохимических исследованиях используется суммарный показатель загрязнения, предложенный Ю. В. Саетом (Гигиеническая оценка..., 1999; Сает и др., 1990). При помощи данного показателя загрязнения производят картографирование загрязнения территорий, требующее выделения геохимических аномалий, однородных по качественным и количественным признакам, выявления связи аномалий с источниками загрязнения, выделения и разделения в пространстве зон воздействия отдельных источников.



**Рис. 7.2.1.** Точки отбора образцов почвы

**Fig. 7.2.1.** Map of soil sampling sites

Объектами исследования являются почвы и почвенный покров территории Карелии. Почвенный покров республики в связи с ее протяженностью с севера на юг, разнообразием форм рельефа, почвообразующих пород мозаичен и разнообразен. Преобладают почвы естественных экосистем – лесные и болотные; сельскохозяйственные и антропогенно нарушенные территории занимают небольшие площади.

Расположение точек по территории республики, данные которых были использованы при расчетах, представлено на схеме (рис. 7.2.1).

Для расчета коэффициента суммарного загрязнения  $Z_c$  тяжелыми металлами почв Республики Карелия были использованы данные валового содержания тяжелых металлов (Cd, Pb, Cu, Zn, Co, Cr, Mn), полученные при проведении исследования загрязнения почв Карелии тяжелыми металлами (Федорец и др., 1998, 2008), исследования почв заповедника «Костомукшский» и отвалов ГОКа (Федорец и др., 2011), исследования загрязнения почв острова Кижы тяжелыми металлами (Ахметова, 2012), исследования загрязнения почв тяжелыми металлами г. Петрозаводска (Новиков, 2015).

Расчет коэффициентов суммарного загрязнения проводился по формуле Ю. В. Саета (1990) в модификации Ю. Н. Водяницкого (2008, 2010), предложившего ряд поправок для расчета данного показателя. В качестве фоновых значений в расчетах применялись результаты исследований загрязнения почв тяжелыми металлами Карелии (Федорец и др., 1998, 2008).

Картосхемы суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами подстилочного и подподстилочного горизонтов исследуемых почв были построены при помощи программы MapInfo 8.5.

Проведенные расчеты коэффициента суммарного загрязнения почв Карелии тяжелыми металлами показывают, что лесные подстилки по данному показателю могут считаться «чистыми», среднее его значения составляет 4,5, а наиболее часто встречающиеся значения – в интервале 2–6 (табл. 7.2.1).

Выделено несколько точек с относительно высокими значениями  $Z_c$ , однако их значение не превышает 16, т. е. здесь загрязнение можно считать допустимым. Тем не менее обнаружены три точки со значением  $Z_c$  более 20, что уже считается умеренно опасным загрязнением.



**Таблица 7.2.1.** Коэффициент суммарного загрязнения тяжелыми металлами почв Республики Карелия (лесная подстилка A0, под-подстилочный горизонт A2)

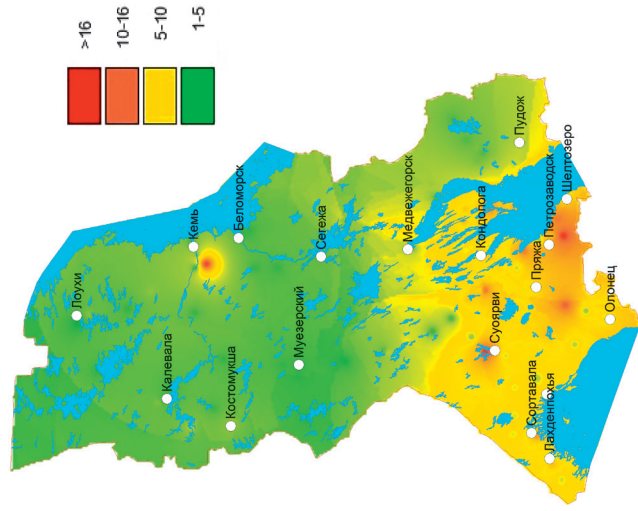
**Table 7.2.1.** Integrated heavy metal pollution index of Karelian soils (forest litter A0, upper mineral horizon A2)

Точка	A0	A2	Точка	A0	A2	Точка	A0	A2
1	4,7	5,4	39	5,7	12,8	77	2,8	15,3
2	3,3	10,6	40	1,9	3,8	78	15,7	6,1
3	2,0	2,5	41	1,9	1,6	79	2,1	0,0
4	3,6	3,2	42	3,6	0,0	80	9,0	1,0
5	2,4	3,0	43	3,5	1,9	81	4,7	10,4
6	3,4	1,4	44	4,6	0,0	82	5,1	10,3
7	2,3	1,0	45	24,6	1,2	83	2,1	4,8
8	2,8	1,4	46	3,4	0,1	84	6,4	1,9
9	4,6	1,7	47	3,1	2,6	85	5,9	11,0
10	3,6	1,3	48	4,3	3,8	86	8,2	8,2
11	2,9	2,3	49	4,5	1,7	87	3,4	13,7
12	2,3	2,1	50	3,9	1,6	88	4,4	2,9
13	2,4	1,9	51	8,9	5,3	89	8,0	7,7
14	2,3	2,3	52	4,9	2,4	90	9,4	7,8
15	2,5	1,3	53	6,6	4,3	91	4,2	5,5
16	3,6	1,0	54	4,0	7,7	92	7,2	2,1
17	1,6	0,2	55	5,3	3,5	93	1,3	1,8
18	2,2	0,9	56	2,9	3,6	94	3,7	6,4
19	5,5	8,3	57	5,3	3,9	95	4,7	1,6
20	1,8	0,6	58	7,5	3,0	96	3,5	2,4
21	2,1	0,8	59	2,7	9,3	97	2,1	1,5
22	2,4	3,2	60	3,7	2,4	98	3,3	2,3
23	3,1	0,3	61	2,0	0,6	99	2,1	2,5
24	2,8	1,8	62	14,5	2,1	100	3,8	2,9
25	2,8	6,4	63	3,7	1,6	101	3,0	4,2
26	3,5	2,0	64	4,7	1,2	102	3,6	2,6
27	2,2	0,1	65	21,8	4,0	103	3,1	1,9
28	2,9	1,0	66	2,8	3,1	104	3,0	2,3
29	2,5	3,1	67	11,1	1,6	105	2,6	2,4
30	1,8	3,1	68	1,5	1,2	106	1,4	2,2
31	2,1	1,2	69	2,6	0,8	107	6,0	2,9
32	4,1	1,7	70	3,1	1,2	108	2,7	2,7
33	2,9	1,3	71	3,9	1,3	Петрозаводск	10,0	11,3
34	4,6	4,0	72	3,9	7,7	Кижы	10,0	10,0
35	1,8	9,1	73	3,8	4,4	Костомукша	8,0	2,5
36	2,2	1,1	74	3,6	1,4	среднее	4,7	3,5
37	3,0	1,7	75	6,2	3,4	max	24,6	15,3
38	20,2	2,2	76	7,2	8,2	min	1,6	0,1

Коэффициенты суммарного загрязнения тяжелыми металлами, рассчитанные для подподстилочных минеральных горизонтов почв Карелии, характеризуются меньшими значениями, чем рассчитанные для лесных подстилок. Средние величины коэффициента  $Z_c$  для минеральных горизонтов почв Карелии находятся на уровне 3,5, максимальные – 15,3. Для почв г. Петрозаводска (главного города-загрязнителя региона) взяты усредненные данные,  $Z_c = 11$ , рассчитанные коэффициенты  $Z_c$  здесь изменялись от 1 до 30 (одна точка). Также были использованы данные о содержании тяжелых металлов в почвах Костомукшского заповедника и Костомукшского ГОКа, рассчитанные коэффициенты для заповедника – 2, а для отвалов ГОКа – 10. Таким образом, наблюдается повышенная концентрация тяжелых металлов в отвалах, однако она не превышает порога умеренно допустимого загрязнения. Ни в одной точке не выявлено превышение данного порога по этому показателю.

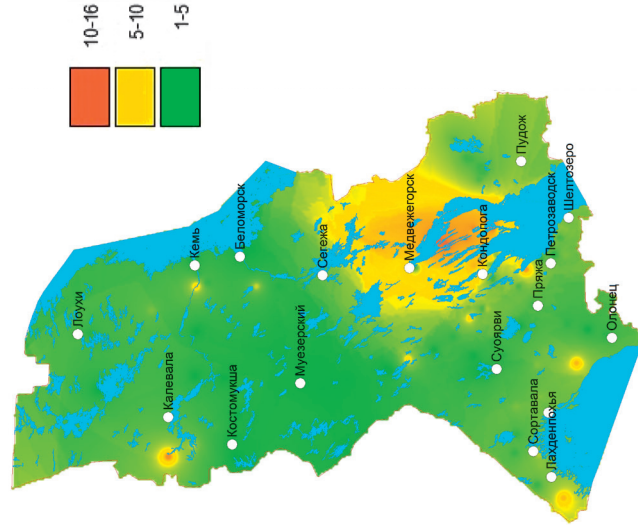
На построенной картосхеме суммарного загрязнения лесной подстилки почв Карелии (рис. 7.2.2) выделяется тенденция повышения значений коэффициента  $Z_c$  с севера ( $Z_c = 1-5$ ) на юг ( $Z_c = 5-10$ ). Меньшими значениями также отличается Пудожский район республики. Данная закономерность, скорее всего, связана с природными особенностями состава лесных подстилок северной и среднетаежной подзон, так как граница подзон проходит примерно на линии изменения цветовой шкалы.

Выделяются несколько отдельных точек с высокими показателями коэффициента, они единичны, и соседние с ними места отбора образцов почвы не характеризуются повышенными значениями, т. е. загрязнение лесных подстилок в этих точках может считаться локальным. Почти все эти точки расположены на юге республики около населенных пунктах, что говорит об антропогенной причине повышенного содержания металлов. Самый высокий показатель  $Z_c$  выявлен в лесной подстилке возле п. Ладва – 21,8, что свидетельствует об умеренном ее загрязнении тяжелыми металлами. Также на севере республики на трассе около г. Кемми выявлена точка (т. 38) с очень высоким значением коэффициента –  $Z_c = 20$ , что говорит о среднем загрязнении подстилок тяжелыми металлами.



**Рис. 7.2.2.** Картограмма коэффициента суммарного загрязнения тяжёлыми металлами лесной подстилки почв Карелии

**Fig. 7.2.2.** Map of heavy metal contamination of forest litters in Karelia, integrated pollution index  $Z_c$



**Рис. 7.2.3.** Картограмма коэффициента суммарного загрязнения тяжёлыми металлами подподстильного горизонта почв Карелии

**Fig. 7.2.3.** Map of heavy metal contamination of the upper mineral horizon of soils in Karelia, integrated pollution index  $Z_c$

Для подстилок почв г. Петрозаводска показатель  $Z_c$  варьирует в очень широких пределах – от 1 до 42 (наблюдаются локальные сильные загрязнения), тем не менее его средние значения здесь находятся на уровне 10–11.

Пространственная неоднородность показателя  $Z_c$  лесных подстилок почв Карелии не повторяет закономерности распределения его для минеральных горизонтов (рис. 7.2.3). В целом территория республики относительно рассчитанных коэффициентов суммарного загрязнения тяжелыми металлами в минеральных горизонтах почв может считаться незагрязненной. Показатели  $Z_c$  в своем большинстве находятся в интервале 1–5.

Выделяется зона более высоких значений  $Z_c$  (5–10), рассчитанных для минеральных горизонтов почв на территории Заонежского рудного бассейна и близлежащих районов. В то же время лесные подстилки почв данной территории не отличаются повышенными показателями. Выявленная закономерность связана с природными особенностями данного региона – распространением шунгитов и шунгитовой морены, характеризующихся высокой концентрацией углерода и микроэлементов-металлов. Поэтому почвы, развитые на этих породах, отличаются не только высоким плодородием, но и повышенным природным фоном тяжелых металлов. Наибольшие значения  $Z_c$  – 15 выявлены в районе п. Шуньга, где ведется добыча шунгита в промышленных масштабах.

Также выделяются несколько точек повышенных значений показателя  $Z_c$  на севере республики, возле п. Войница (т. 2) – 10, п. Пушной (т. 25) – 6,4, вдоль трассы от г. Кеми возле п. Авнепорог (т. 35) – 9,1. Однако  $Z_c$  в этих точках не превышает уровней, свидетельствующих о начале загрязнения.

На юге республики также выделяются несколько точек (т. 54 и 59) с повышенным по сравнению с фоном  $Z_c$  – 6–7.

Проведенные расчеты коэффициента суммарного загрязнения тяжелыми металлами  $Z_c$  почв Карелии позволяют сделать вывод о том, что территория Карелии может характеризоваться низким уровнем загрязнения почвенного покрова. Однако отмечены несколько точек с высокими показателями  $Z_c$ , означающими среднее локальное загрязнение.

Выявлены некоторые закономерности пространственной неоднородности  $Z_c$  для лесных подстилок и минеральных горизонтов почв. Отмечается, что рассчитанные значения  $Z_c$  для лесных подстилок выше, чем для минеральных горизонтов. Однако закономерности пространственной неоднородности данного коэффициента для этих горизонтов почв не совпадают. Для лесной подстилки прослеживается увеличение коэффициента с севера на юг на границе перехода средней и северной таежной подзон, тогда как для минерального подподстилочного горизонта почв выявлена зона повышенных значений  $Z_c$  – Заонежский рудный район, характеризующийся высокими природными значениями содержания тяжелых металлов формирующихся там почв.

Построенные картосхемы  $Z_c$  делают возможным систематизировать информацию по ТМ по всему региону и наглядно представить данные для анализа тенденций загрязнения почв Карелии ассоциациями тяжелых металлов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние несколько десятилетий был накоплен достаточно обширный материал по особенностям содержания тяжелых металлов как в незагрязненных, так и в подверженных антропогенному загрязнению почвах Карелии.

На территориях государственных природных заповедников «Кивач» и «Костомукшский» организован фоновый почвенный мониторинг, целью которого является оценка состояния наиболее распространенных на территории республики типов почв. Получен обширный массив данных, позволяющий оценить состояние почвенного покрова заповедных территорий как эталонных для проведения исследований загрязнения почв. Было установлено, что перераспределение тяжелых металлов-микроэлементов в процессе выветривания и почвообразования происходит, в основном, на уровне концентраций, которыми характеризуются почвообразующие породы.

Получены данные о естественном содержании тяжелых металлов в почвообразующих породах и почвах различного типа, распространенных в среднетаежной подзоне Карелии. В изученных почвах выявлены преимущественно низкие концентрации исследуемых элементов, не превышающие нормативные показатели и фоновые для почв Карелии значения. Изучение миграции тяжелых металлов по генетическому профилю почв показало ее зависимость от особенностей генезиса почв и наличия радиальных геохимических барьеров. Так, в почвах подзолистого генезиса распределение элементов по профилю характеризуется биогенным накоплением в лесной подстилке и элювиально-иллювиальным типом миграции в минеральной толще. Почвам буроземного типа почвообразования свойственно более равномерное распределение микроэлементов по профилю.

Исследования влияния аэротехногенных поллютантов Костомукшского горно-обогачительного комбината на почвы прилегающей территории показали, что по прошествии 27 лет процесс за-

грязнения лесных подстилок продолжается, о чем свидетельствует возрастание в них количества меди, никеля, кобальта, хрома, марганца. В то же время снизилось накопление свинца, а кадмия, цинка и железа осталось на прежнем уровне, что свидетельствует об изменении структуры выбросов или интенсивности деятельности. В целом содержание всех металлов в лесных подстилках исследованных почв ниже ПДК, превышение выявлено лишь для никеля. Исследования воздействия аэротехногенных поллютантов на микробиологические свойства почв в районе Костомукшского ГОКа свидетельствуют об изменении структуры микробного ценоза. На основании данных микробиально-биохимических исследований зону вокруг Костомукшского ГОКа можно условно разделить на импактную (до 2 км) и буферную (2–5 км). В импактной зоне прослеживается увеличение численности, изменение состава и функциональной активности микроорганизмов, а также активности ферментов. В буферной зоне изменения микробоценоза отмечены на уровне тенденции: микробное сообщество, адаптируясь к новым условиям фитоценотической среды, формирует специфические трофические связи, поэтому их реабилитация при снятии антропогенного пресса возможна.

Исследования загрязнения тяжелыми металлами городских почв на примере самого крупного города региона – Петрозаводска выявило, в общем, невысокий уровень его загрязнения тяжелыми металлами. Среднее значение комплексного показателя загрязнения для территории г. Петрозаводска составляет 5,5, т. е. можно сделать вывод, что почвы имеют минимально низкий уровень загрязнения, который соответствует «допустимой» категории загрязнения. По данным исследований, приоритетным загрязнителем является свинец, также обнаружено незначительно повышенное содержание цинка, никеля и меди относительно принятых в России нормативов. Выявлено, что структурно-функциональная организация микробоценоза почв рекреационной и промышленной зон города определяется как свойствами самих микробных сообществ почв, так и уровнем антропогенного воздействия. Прослеживается зависимость пороговой чувствительности микроорганизмов к урбанистическому прессу от их систематического положения. В целом микроорганизмы исследуемых почв зоны рекреации и про-

мышленной зоны по степени устойчивости к антропогенному воздействию можно расположить в следующем порядке возрастания: бактерии – актиномицеты – грибы.

В связи с тем что на территории республики одним из распространенных антропогенных факторов является вырубка лесов, были проведены исследования, направленные на выявление особенностей трансформации микроэлементного состава почв вырубок. Как показали исследования, сильных изменений в содержании и распределении тяжелых металлов в верхних почвенных горизонтах, которые подвергаются наибольшему травмирующему воздействию, не происходит. Установлено, что концентрация тяжелых металлов изучаемых почв не превышает ПДК и фонового для почв Карелии уровня их содержания.

Основными источниками загрязнения территории Республики Карелия тяжелыми металлами являются промышленные центры: города Петрозаводск, Костомукша и Кондопога, а также менее крупные населенные пункты и автомобильные, железнодорожные и водные магистрали. Кроме того, республика подвергается аэротехногенному загрязнению промышленными предприятиями соседних регионов.

Несмотря на вышесказанное, концентрации металлов в почвах республики редко достигают предельно допустимых концентраций. Расчеты коэффициента суммарного загрязнения позволяют сделать вывод о том, что территория Карелии характеризуется минимально низким уровнем загрязнения почв тяжелыми металлами.



## CONCLUSION

Over the past several decades substantial material has been gathered in Karelia on heavy metal content in both undisturbed soils and those exposed to human impact.

Background soil monitoring has been set up in strict nature reserves Kostomukshsky and Kivach in order to assess the status of the republic's most common soil types. An extensive data pool has been amassed, permitting to assess the condition of the soil cover in these protected areas to serve as reference in soil pollution surveys. One of the findings was that the redistribution of heavy metal microelements during weathering and soil formation is mainly in line with the concentrations pertinent to the parent rock.

Data were obtained on the natural levels of heavy metals in parent rocks and soils of different types in the mid-taiga subzone of Karelia. The surveyed soils chiefly contained low concentrations of the studied elements, not exceeding either normative values or background values. Investigation of heavy metal migration along the soil genetic profile showed a correlation with specific features of soil genesis and the presence of radial geochemical barriers. To wit, the distribution of elements along the profile in soils of podzolic genesis features their biogenic accumulation in the forest floor and the eluvial-illuvial type of migration in mineral horizons. Soils with the brown-earth type of soil formation exhibit a more uniform distribution of microelements along the profile.

Research into the effects of air-borne industrial pollution from the Kostomuksha mining and ore-dressing mill on surrounding soils has shown that after 27 years the process of forest floor contamination continues, as evidenced by growing concentrations of copper, nickel, cobalt, chromium, manganese. On the other hand, lead accumulation has declined, and cadmium, zinc and iron storage remained at the same level, indicating a change in the structure of emissions or the scope of activities. Generally speaking, the levels of all metals in forest litters in

the surveyed soils were below MPC, only nickel showing an excess. Studies of the impact of air-borne industrial pollution on the microbiological properties of soils around the Kostomuksha mill have revealed a change in the structure of the microbial community. Judging by data from microbial-biochemical surveys the area around the Kostomuksha mill can be roughly differentiated into the impact zone (up to 2 km) and the buffer zone (2-5 km). In the impact zone there is a rise in microorganism numbers, changes in the composition and functional activity of microorganisms, as well as enzymatic activity. Changes in the microbial community in the buffer zone appear as a trend: as it adapts to the new environmental circumstances the microbial community establishes specific trophic links, which enable its rehabilitation after elimination of human pressure.

Surveys of the heavy metal contamination of urban soils, specifically in the region's biggest city – Petrozavodsk, revealed a generally quite low level of heavy metal pollution. The average value of the integrated pollution index for the City of Petrozavodsk is 5.5, i.e. the pollution level of the soils is very low, meeting the 'permissible' pollution requirements. According to previous surveys, the primary soil pollutant in central parts of Petrozavodsk (Fedorets and Medvedeva, 2005) is lead, and the present study corroborates this finding. Zinc, nickel and copper levels were found to be slightly higher than the normative limits accepted in Russia. The studies showed also that the structural and functional organization of microbial communities in soils of the recreational and industrial zones of the city depended both on the inherent properties of the communities themselves and on the scope of human impact. A correlation was observed between the threshold sensitivity of microorganisms to urban pressure and their taxonomic position. Overall, in terms of resistance to human pressure microorganisms in soils of the recreational and industrial zones form the following sequence of increase: bacteria – actinomycetes – fungi.

Since a major human impact in the republic is logging, studies were carried out to identify patterns in the transformation of the microelement composition of soils in felled sites. According to these studies, there have been no profound changes in the content and distribution of heavy metals in the topsoil, which is the most heavily

affected by the impact. The concentrations of heavy metals in the studied soils did not exceed MPC or regional backgrounds.

The principal sources of heavy metal pollution in the Republic of Karelia are industrial towns: Petrozavodsk, Kostomuksha and Kondopoga, as well as smaller settlements. This is where one would usually find contaminated forest litters. Sources in Petrozavodsk contaminate the environment with lead, Kostomuksha mining complex – with iron and chromium, Kondopoga industries are the source of quite a number of heavy metals. Other sources of environmental pollution are by highways, railroads and water transport routes. In addition, southern and south-western parts of the republic are contaminated by air-borne zinc and cadmium from Leningrad Region industries, and south-eastern and eastern parts – by manganese from the Arkhangelsk Region.

In spite of what has been said, metal concentrations in soils of the republic rarely rise up to maximum permissible levels. The conclusion following from the calculations of the total pollution index is that the level of heavy metal pollution of soils in Karelia is minimal.

## ЛИТЕРАТУРА

## REFERENCES

*Агрохимические методы* исследования почв / Ред А. В. Соколов. М.: Наука, 1975. 488 с.

*Акентьева Л. И., Беляева В. А.* Влияние промышленных выбросов металлургического комплекса на растения и некоторые свойства // Почвоведение. 1992. № 9. С. 164–169.

*Актуальные проблемы* изменения природной среды за рубежом. М.: МГУ, 1976. С. 19–43.

*Алексеев Ю. В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.

*Алексеев В. А.* Экологическая геохимия: Учебник. М.: Логос, 2000. 627 с.

*Алексеев В. А., Алексеев А. В.* Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2013. 388 с.

*Алексеев В. А., Алексеев Л. П.* Геохимические барьеры. М.: Логос, 2003. 144 с.

*Альтишулер И. И., Ермаков Ю. Т.* Загрязнение атмосферы Земли // Актуальные проблемы изменения природной среды за рубежом. М.: МГУ, 1976. С. 19–43.

*Анучин Н. П.* Лесная таксация. 3-е изд-е. М.: Лесная промышленность, 1971. 512 с.

*Арманд А. Д.* Устойчивость (гомеостатичность) географических систем к различным типам внешних воздействий // Устойчивость геосистем. М.: Наука, 1983. С. 14–32.

*Артамонова В. С.* Микробиологические особенности антропогенно преобразованных почв Западной Сибири. Новосибирск: СО РАН, 2002. 225 с.

*Ахметова Г. В.* Геохимические особенности почв о. Кижы // Геохимия ландшафтов и география почв (к 100-летию

М. А. Глазовской): Докл. Всерос. науч. конф. Москва, 4–6 апр. 2012 г. М.: МГУ, 2012. С. 28–31.

*Ахметова Г. В.* Особенности внутрипрофильной миграции микроэлементов и радиальные геохимические барьеры в почвах ландшафтов среднетаежной подзоны Карелии // Эколого-геохимические и биологические закономерности почвообразования в таежных лесных экосистемах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 30–44.

*Ахметова Г. В.* Содержание микроэлементов в почвообразующих породах и лесных почвах озерно-ледниковых равнин среднетаежной Карелии // Лесной вестник. 2008. № 2. С. 16–21.

*Ахметова Г. В., Новиков С. Г.* Загрязнение свинцом почв различных категорий землепользования на территории города Петрозаводска // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1; URL: [www.science-education.ru/115-12194](http://www.science-education.ru/115-12194) (дата обращения: 25.02.2015).

*Басьров Н. Ф., Валеева Э. И., Московченко Д. В.* Эколого-геохимические исследования Белоярского района Тюменской области // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. Вып. 1. Тюмень: ИПОС СО РАН, 2000. С. 3–10.

*Безносиков В., Лодыгин Е., Кондратенко Б.* Фоновое содержание тяжелых металлов в почвах районов Республики Коми // Вестник ИБ. 2005. № 2. С. 12–16.

*Белых Л. И., Рябчикова И. А., Серышев В. А. и др.* Геохимические и гигиенические интегральные показатели оценки химического загрязнения почв // Геохимия биосферы (к 90-летию А. И. Перельмана). М.; Смоленск, 2006. С. 64–65.

*Беспамятнов Г. П., Кротов Ю. А.* Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. Л.: Химия, 1985. 528 с.

*Богатырев Л. Г., Ладонин Д. В., Семенюк О. В.* Микроэлементный состав некоторых почв и почвообразующих пород южной тайги Русской равнины // Почвоведение. 2003. № 5. С. 568–576.

*Бухтояров Ф. Е., Устинов Б. Б., Саланович Т. Н. и др.* Целлюлазный комплекс гриба *Chrysosporium lucknowensi*: выделение и характеристика эндоглюканаз и целлобиогидролаз // Биохимия. 2004. Т. 69, вып. 5. С. 666–677.

*Ведрова Э. Ф.* Влияние сосновых насаждений на свойства почв. Новосибирск: Наука, 1980. 104 с.

*Веригина К. В., Добрицкая Ю. И., Журавлева Е. Г. и др.* Влияние процессов почвообразования на распределение микроэлементов в основных типах почв европейской части СССР // Доклады к VII Междунар. конгр. почвоведов. М., 1964. С. 47–78.

*Вернадский В. И.* Об анализе почв с геохимической точки зрения // Почвоведение. 1936. № 1. С. 6–18.

*Виноградов А. П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: АН СССР, 1957. 237 с.

*Виноградов А. П.* Среднее содержание элементов в земной коре // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–557.

*Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние сосновых лесов северной Карелии / Лазарева И. П., Кучко А. А., Кравченко А. В. и др.* Петрозаводск, 1992. 52 с.

*Водяницкий Ю. Н.* Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368–375.

*Водяницкий Ю. Н.* Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М., 2008. 164 с.

*Водяницкий Ю. Н.* Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1276–1280.

*Возможности современных и будущих фундаментальных исследований в почвоведении.* М.: Геос, 2000. 138 с.

*Волков А. Д., Громцев А. Н., Еруков Г. В. и др.* Экосистемы ландшафтов запада средней тайги (структура, динамика). Петрозаводск: Карелия, 1990. 284 с.

*Володин А. М., Тойкка М. А.* Некоторые данные о содержании микроэлементов в почвообразующих породах южной Карелии // Учен. зап. Петрозаводского ун-та. 1965. Т. 13, вып. 3. С. 42–48.

*Воронцов А. М.* Обобщенные показатели состояния в системе индексов качества природных сред: проблемы и перспективы // Экологическая химия. 2004. Т. 14, № 1. С. 1–10.

*Выборов С. Г., Павелко А. И., Щукин В. Н., Янковская Э. В.* Оценка степени опасности загрязнения почв по комплексному показателю нарушенного геохимического поля // Современные проблемы загрязнения почв: Междунар. науч. конф. М., 2004. С. 195–197.

*Герасимова М. И., Строгонова М. Н., Можарова Н. В., Прокофьева Т. В.* Антропогенные почвы. Смоленск: Ойкумена, 2003. 268 с.

*Гигиеническая оценка* качества почвы населенных мест: Метод. указания. М.: ФЦ ГСЭН Минздрава России, 1999. 38 с.

*Глазовская М. А.* Почвенно-геохимическое картографирование для оценки экологической устойчивости среды // Почвоведение. 1992. № 6. С. 5–13.

*Глазовская М. А.* Принципы классификации природных геосистем по устойчивости к техногенезу и прогнозно-ландшафтно-геохимическое районирование // Устойчивость геосистем. М.: Наука, 1983. С. 61–78.

*Глазовская М. А.* Проблемы и методы оценки эколого-геохимической устойчивости почв и почвенного покрова к техногенным воздействиям // Почвоведение. 1999. № 1. С. 114–124.

*ГН 2.1.7.2041-06.* Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Утв. Главным санитарным врачом РФ 19.01.2006. Изд. офиц. М.: ИИЦ Минздрава России, 2006. С. 15.

*ГН 2.1.7.2511-09.* Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Утв. Главным санитарным врачом РФ 18.05.2009. Изд. офиц. М.: ИИЦ Минздрава России, 2009. С. 3.

*Горький А. В.* Химическое загрязнение почво-грунтов Санкт-Петербурга // Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в 2006 году / Под ред. Д. А. Голубева, Н. Д. Сорокина. СПб.: Сезам-Принт, 2007. С. 349.

*Государственный доклад* о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2007 году. М.: Минприроды РФ, 2008. 503 с.

*Государственный доклад* о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1998 году. Петрозаводск: РИО Комиздата РК, 1999. 263 с.

*Государственный доклад* о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1999 году. Петрозаводск, 2000. 213 с.

*Государственный доклад* о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2013 г. / А. Н. Громцев (гл. ред.) и др. Петрозаводск, 2014. 300 с.

Громов Б. В., Павленко Г. В. Экология бактерий. Л.: ЛГУ, 1989. 250 с.

Гузев В. С., Левин С. В. Перспективы эколого-микробиологической экспертизы состояния почв при антропогенных воздействиях // Почвоведение. 1991. № 9. С. 50–63.

Гузев В. С., Левин С. В., Звягинцев Д. Г. Реакция микробной системы почв на градиент концентрации тяжелых металлов // Микробиология. 1985. Т. 54, вып. 3. С. 414–420.

Добровольский В. В. Биосферные циклы тяжелых металлов и регуляторная роль почвы // Почвоведение. 1997. № 4. С. 431–441.

Добровольский В. В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.

Добровольский В. В. Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами // Почвоведение. 1999. № 5. С. 639–645.

Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М.: Academia, 2003. 397 с.

Добровольский В. В. Тяжелые металлы: загрязнение окружающей среды и глобальная геохимия // Тяжелые металлы в окружающей среде. М.: МГУ, 1980. С. 3–12.

Дымов А. А., Каверин Д. А., Габов Д. Н. Свойства почв и почвоподобных тел г. Воркута // Почвоведение. 2013. № 2. С. 240–248.

Евдокимова Г. А. Эколого-микробиологические основы охраны почв Крайнего Севера. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 272 с.

Елпатьевский П. В., Луценко Т. Н. Распределение и формы нахождения тяжелых металлов в горных буроземах Сихоте-Алиня как индикатор химического ореола рассеяния // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. М.: Наука, 1982. 387 с.

Елькина Г. Я. Тяжелые металлы в системе почва – растение и подходы к нормированию их содержания в подзолистых почвах. Сыктывкар, 2007. 32 с.

Елькина Г. Я., Безносиков В. А. Формы соединений тяжелых металлов в подзолистых почвах и их фитотоксичность // Эколого-генетические аспекты почвообразования на европейском Северо-Востоке. Сыктывкар, 1996. С. 91–100.



*Елькина Г. Я., Безносиков В. А., Мокиев В. В.* Мониторинг почв европейского Северо-Востока // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз, ситуации, пути развития, решения: Материалы междунар. конф. Т. 1. Архангельск, 2002. С. 556–558.

*Ефремова Т. Т., Ефремов С. П., Куценогий К. П. и др.* Биогеохимия Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Ti, V, Mo, Ta, W, U в низинном торфянике на междуречье Оби и Томи // Почвоведение. 2003. № 5. С. 557–567.

*Звягинцев Д. Г.* Перспективы развития биологии почв // Тр. Всерос. конф. «Перспективы развития почвенной биологии». М.: МАКС ПРЕСС, 2001. С. 10–21.

*Звягинцев Д. Г.* Почва и микроорганизмы. М.: МГУ, 1987. 256 с.

*Зенова Г. М., Лобакова Е. С., Широких И. Г., Иванова Е. А.* Актиномицеты – ассоциативные компоненты цианобактериальных сообществ и симбиозов // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 3. С. 11–20.

*Золотарева Б. Н., Скрипниченко И. И.* Геохимические аспекты мониторинга тяжелых металлов // Региональный экологический мониторинг. М.: Наука, 1983. С. 93–114.

*Зырин Н. Г.* Узловые вопросы учения о микроэлементах в почвоведении: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 1968. 37 с.

*Зябченко С. С.* Сосновые леса Европейского Севера. Л.: Наука, 1984. 244 с.

*Израэль Ю. А.* Экология и контроль состояния природной среды. М., 1984. 560 с.

*Ильин В. Б.* К вопросу о разработке ПДК тяжелых металлов // Агрохимия. 1985. № 10. С. 94–101.

*Ильин В. Б.* О нормировании содержания тяжелых металлов в растениях // Химия в с.-х. 1987. № 8. С. 63–65.

*Ильин В. Б.* Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // Агрохимия. 1995. № 10. С. 109–113.

*Ильин В. Б.* Тяжелые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.

*Ильин В. Б.* Фоновое содержание тяжелых металлов в почвах – важный компонент экологического мониторинга // Докл. II междунар. науч.-практ. конф. «Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде». Т. 1. Семипалатинск, 2002. С. 141–147.

*Ильин В. Б., Сысо А. И.* Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск, 2001. 229 с.

*Ийцксон Е. Е., Лантратова А. С.* Парк Онежского тракторного завода в г. Петрозаводске // Карелия: Энциклопедия: в 3-х т. / Под ред. А. Ф. Титова. Т. 2. Петрозаводск: ПетроПресс, 2009. С. 346.

*Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

*Кашин В. К., Иванов Г. М.* Хром в почвах Западного Забайкалья // Почвоведение. 2002. № 3. С. 311–318.

*Кашулина Г. М.* Аэротехногенная трансформация почв Европейского Субарктического региона. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. Ч. 1. 158 с.; Ч. 2. 234 с.

*Кашулина Г. М., Салтан Н. В.* Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината «Североникель». Апатиты: КНЦ РАН, 2008. 235 с.

*Кашулина Г. М., Чекушев В. А., Богатырев И. В.* Физическая деградация и химическое загрязнение почв Северо-Запада Европы // Современные проблемы загрязнения почв: Сб. материалов II Международ. конф. М., 2007. С. 74–78.

*Ковда В. А.* Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.

*Ковда В. А.* Основы учения о почвах. Кн. 1. М.: Наука, 1973. 447 с.

*Ковда В. А., Якушевская И. В., Тюрюканов А. Н.* Микроэлементы в почвах Советского Союза. М.: МГУ, 1959. 67 с.

*Копчик Г. Н., Надбаев Н. П., Копчик С. В., Павлюк И. Н.* Загрязнение почв лесных экосистем тяжелыми металлами под влиянием атмосферных выбросов комбината «Печенганикель» // Почвоведение. 1998. № 8. С. 988–995.

*Коробицина Ю. С., Попова Л. Ф., Васильева А. И., Усачева Т. В.* Экологическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова г. Северодвинска // Научный диалог. 2013. № 3 (15). С. 75–93.

*Кузьмин В. А.* Геохимические барьеры в почвах Прибайкалья // Почвоведение. 2000. № 10. С. 1197–1202.

*Ладонин Д. В.* Конкурентные взаимоотношения ионов при загрязнении почвы тяжелыми металлами // Почвоведение. 2000. № 10. С. 1285–1293.

*Ладонин Д. В.* Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. 2002. № 6. С. 683–692.

*Лазарева И. П., Кучко А. А., Кравченко А. В. и др.* Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние сосновых лесов северной Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. 51 с.

*Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение* / Ред. В. А. Алексеев. Л.: Наука, 1990. 198 с.

*Летунова С. В., Алексеева С. А., Ниязов Г. А.* Влияние геохимических факторов среды обитания на групповую структуру микробных сообществ в почвах // Экология. 1982. № 2. С. 30–35.

*Лукина Н. В., Никонов В. В.* Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. Ч. 1. 213 с.; Ч. 2. 192 с.

*Лумме И., Архипов В., Федорец Н., Мялкенен Э.* Состояние сосняков в районах Карельского перешейка юго-восточной Финляндии и Костомукши-Кайнуу // Бюл. науч.-исслед. ин-та леса Финляндии. Научный центр Ванта. 1997. Вып. 665. 75 с.

*Малахов С. А., Сенилов М. Б.* Зависимость содержания металлов в почве и в снежном покрове от расстояния до места их выбросов // Почвоведение. 1992. № 9. С. 141–144.

*Марфенина О. Е.* Нарушение эколого-географической зональности комплексов микроскопических грибов в почвах при антропогенных воздействиях // Перспективы развития почвенной биологии: Тр. всерос. конф. М.: МАКС ПРЕСС, 2001. С. 79–94.

*Медведева М. В.* Микробиологический мониторинг состояния городских почв // Гигиена и санитария. 2010. № 1. С. 45–48.

*Медведева М. В., Бахмет О. Н.* Состояние почвенного лесного комплекса, загрязненного поллютантами, на Северо-Западе России // Лесоведение. 2001. № 6. С. 47–50.

*Медведева М. В., Бахмет О. Н., Яковлев А. С.* Биологическая диагностика аэротехногенного загрязнения почв Восточной Финляндии // Почвоведение. 2003. № 1. С. 106–112.

*Медведева М. В., Федорец Н. Г., Яковлев А. С., Савельев Л. Л.* Экологическая оценка почв техногенных зон урбанизированных территорий // Транспорт и наука. 2014. № 1 (50). С. 42–45.

*Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами.* М.: ИМГРЭ, 1982. 112 с.

*Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства.* М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.

*Методы почвенной микробиологии и биохимии: Учебное пособие / Под ред. Д. Г. Звягинцева.* М.: МГУ, 1991. 304 с.

*Микроэлементы в почвах Советского Союза. Вып. 1. Микроэлементы в почвах европейской части СССР / Под ред. В. А. Ковды, Н. Г. Зырина.* М.: МГУ, 1973. 282 с.

*Микроэлементы в почвах СССР, подвижные формы микроэлементов в почвах Европейской части СССР / Под ред. Н. Г. Зырина, Г. Д. Белицыной.* М.: МГУ, 1981. 250 с.

*Минкина Т. М., Мотузова Г. В., Назаренко О. Г.* Взаимодействие тяжелых металлов с органическим веществом чернозема обыкновенного // Почвоведение. 2006. № 7. С. 804–811.

*Морозова Р. М.* Географические закономерности формирования почвенного покрова Карелии // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии. Петрозаводск, 1999. С. 218–219.

*Морозова Р. М.* Лесные почвы Карелии. Л.: Наука, 1991. 184 с.

*Морозова Р. М., Лазарева И. П.* Лесорастительные свойства почв сосновых лесов // Плодородие почв сосновых лесов Карелии. Петрозаводск, 1979. С. 5–48.

*Морозова Р. М., Федорец Н. Г.* Современные процессы почвообразования в хвойных лесах Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. 282 с.

*Мотузова Г. В.* Соединения микроэлементов в почвах. Системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 168 с.

*Назаров А. Г.* Современная миграция тяжелых металлов в биосфере. М.: ВНИЦентр, 1980. 188 с.

*Нейтрализация загрязненных почв / С. Б. Адьяев и др.; под общей редакцией Ю. А. Можайского. Рязань: ГНУ НИИГиМ, 2008. 527 с.*

*Нечаева Е. Г. Ландшафтно-геохимический анализ динамики тяжелых геосистем. Иркутск: Институт географии СО АН СССР, 1985. 184 с.*

*Никонов В. В., Лукина Н. В., Дером Д. и др. Миграция и аккумуляция соединений никеля и меди в Al-Fe-гумусовых подзолистых почвах сосновых лесов (зона воздействия комбината «Североникель») // Почвоведение. 1994. № 11. С. 31–41.*

*Новиков С. Г. Оценка загрязнения тяжелыми металлами почв различных категорий землепользования на территории г. Петрозаводска // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Экологические исследования. 2015. № 1. С. 78–85.*

*Новиков С. Г. Радиальное распределение валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов в почвах г. Петрозаводска на землях общего пользования // Современные проблемы науки и образования. 2014а. № 1; URL: [www.science-education.ru/115-12088](http://www.science-education.ru/115-12088) (дата обращения: 25.02.2015).*

*Новиков С. Г. Экологическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почв урбанизированных территорий по категориям землепользования (на примере г. Петрозаводска): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2014б. 24 с.*

*Онегина Л. К., Тойкка М. А. Микроэлементы в природных водах и донных отложениях озер Карелии // Микроэлементы в биосфере Карелии и сопредельных районов. Петрозаводск, 1976. С. 86–154.*

*Орлов Д. С., Малинина М. С., Мотузова Г. В. и др. Химическое загрязнение почв и их охрана. М.: Агропромиздат, 1991. 303 с.*

*Орлов Д. С., Садовникова Л. К., Суханова Н. И. Химия почв. М.: Высшая школа, 2005. 558 с.*

*Переверзев В. Н. Гумус подзолистых почв разного гранулометрического состава // Почвоведение. 1992. № 8. С. 48–57.*

*Переверзев В. Н., Свейструп Т. Е., Стрелкова М. С. Аккумуляция никеля и меди в лесных подзолах в результате выбросов предприятий цветной металлургии // Почвоведение. 2002. № 3. С. 364–367.*

Перевозчикова А. И., Тойкка М. А., Левкина Т. И. К геохимии микроэлементов в ландшафтах Карелии // Почвенные исследования в Карелии. Петрозаводск, 1974. С. 23–36.

Перевозчикова Е. М. Микроэлементы в почвах и почвообразующих породах юго-восточной Карелии // Микроэлементы в сельском хозяйстве: Учен. зап. Петрозаводского гос. ун-та им. О. В. Куусинена. Т. XIV. Вып. 3. Биологические и сельскохозяйственные науки. Петрозаводск, 1966. С. 55–58.

Перевозчикова Е. М., Крохина А. М. Содержание микроэлементов в лесных и освоенных суглинистых почвах Карелии // Современные почвенные процессы и плодородие почв Карелии. Петрозаводск, 1979. С. 149–168.

Перельман А. И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1989 527 с.

Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафтов. М.: МГУ, 1999. 610 с.

Подкопаева Д. А., Грабович М. Ю., Дубина Г. А. Окислительный стресс и системы антиоксидантной защиты клеток у микроаэрофильных бактерий *Spirillum winogradskii* // Микробиология. 2003. № 5. С. 600–608.

Полянская Л. М., Головченко А. В., Звягинцев Д. Г. Микробная биомасса в почвах // Докл. АН РАН. 1995. Т. 344, № 6. С. 846–848.

Пономарева В. В. К вопросу о роли растительности в подзолообразовании // Почвоведение. 1955. № 8. С. 1–12.

Попова Л. Ф., Пилюгина М. В. Особенности кумуляции и миграции химических элементов 1 класса опасности в почвах урболандшафтов г. Архангельска // Фундаментальные исследования. 2009. № 4. С. 86–88.

Почва, город, экология / Под общей ред. Г. В. Добровольского. М.: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. 320 с.

Протасова Н. А. Редкие и рассеянные микроэлементы (Mn, Cr, V, Ni, Cu, Zn, Co, Mo, Be, Ti, Zr, Ga, Sr, Ba, I, B) в почвообразующих породах центрального Черноземья // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2003. № 2. С. 164–171.

Протасова Н. А., Беляев А. Б. Макро- и микроэлементы в почвах центрально-черноземной зоны и почвенно-геохимическое районирование ее территории // Почвоведение. 2000. № 2. С. 204–211.

*Протасова Н. А., Щербаков А. П.* Особенности формирования микроэлементного состава зональных почв Центрального Черноземья // Почвоведение. 2004. № 1. С. 50–59.

*Путеводитель экскурсий.* Карелия. Междунар. союз по изучению четвертичного периода. XI конгресс. М., 1982. 47 с.

*Решетников С. И.* Формы соединений меди в загрязненных и фоновых дерново-подзолистых почвах // Биологические науки. 1990. № 4. С. 114–123.

*Руководство по санитарно-химическому исследованию почв (нормативные документы).* М.: ГКСЭНРФ, 1993. 131 с.

*Руководство пользователя ArcGIS 9 Geostatistical Analyst.* ESRI. 2001. 278 с.

*Рыбаков Д. С. и др.* Климатические и геохимические аспекты формирования экологических рисков в Республике Карелия. СПб.: ЭлекСис, 2013. 130 с.

*Рэуце К., Кырстя С.* Борьба с загрязнением почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 221 с.

*Сает Ю. В., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 334 с.

*Сапрыкин Ф. Я.* Геохимия почв и охрана природы. Геохимия, повышение плодородия и охрана почв. Л.: Недра, 1984. 231 с.

*Сеничкина М. Г., Абашеева Н. Е.* Микроэлементы в почвах Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 176 с.

*Сериков В. Н.* Тяжелые металлы в почвах полеводческих ландшафтов Ростовской области и Краснодарского края // Экология: Опыт. Проблемы. Поиск. Академия естествен. наук РСФСР. Секция наук о земле. Новороссийск, 1991. С. 108–113.

*Скворцова И. Н., Якушкина Е. В.* Изменение показателей микробиологической активности дерново-подзолистой почвы при различном содержании в ней тяжелых металлов // Мелиорация, использование и охрана почв Нечерноземной зоны. М.: МГУ, 1980. С. 187–188.

*Скугорева С.* Роль металлосвязывающих белков и пептидов в детоксикации тяжелых металлов // Вестник Ин-та Коми НЦ РАН. 2005. № 8. С. 28–31.

Смагин А. В. Ресурсная характеристика почв и вопросы экологического нормирования / Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель. М.: НИИ Природа, 2013. С. 61–81.

Сорокин Н. Д., Королева Е. Б., Лосева Е. В., Осинцева Н. В. Пособие по вопросам изучения загрязненных земель и их санации. СПб., 2012. 119 с.

Стурман В. И. Экологическое картографирование: Учебное пособие. М.: Аспект Пресс, 2003. 251 с.

Сутурин А. Н. Геохимические черты антропогенных процессов // Геохимия техногенных процессов. М.: Наука, 1990. С. 60–74.

Сысо А. И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: СО РАН, 2007. 277 с.

Тойкка А. М. О закономерностях содержания микроэлементов в горных и почвообразующих породах, почвах и водах Карелии // Почвы Карелии и пути повышения их плодородия. Петрозаводск, 1971. С. 165–170.

Тойкка М. А. Микроэлементы в шунгитовых почвах Заонежья // Учен. зап. Петрозаводского ун-та. Биологические науки. 1958. Т. 8, вып. 3.

Тойкка М. А. Шунгит как местное удобрение // Учен. зап. Карело-Финского гос. ун-та. Т. 1. Петрозаводск, 1946. С. 215–269.

Тойкка М. А., Левкина Т. И., Перевозчикова Е. М. Микроэлементы в почвах Карелии // Развитие науки за 50 лет Советской власти. Петрозаводск, 1970. С. 95–106.

Тойкка М. А., Перевозчикова Е. М., Левкина Т. И. и др. Микроэлементы в Карелии. Л.: Наука, 1973. 284 с.

Тойкка М. А., Сахаров А. А. Некоторые данные о содержании свинца в почвах Карелии // Микроэлементы в сельском хозяйстве: Учен. зап. Карело-Финского гос. ун-та. Т. XIII, вып. 3. Биологические и сельскохозяйственные науки. Петрозаводск, 1965. С. 74–75.

Третьяков В. Н., Горский П. В., Самойлович Г. Г. Справочник таксатора. М.: Гослестехиздат, 1965. С. 81–94.

Тюрин А. В. Таксация леса. М.: Гослестехиздат, 1945. 376 с.



*Федорец Н. Г.* Почвенный мониторинг в Карелии // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии. Петрозаводск, 1999. С. 225.

*Федорец Н. Г., Бахмет О. Н.* Экологические особенности трансформации соединений углерода и азота в лесных почвах. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. 239 с.

*Федорец Н. Г., Бахмет О. Н., Солодовников А. Н., Морозов А. К.* Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.

*Федорец Н. Г., Дьяконов В. В., Литинский П. Ю., Шильцова Г. В.* Загрязнение лесной территории Карелии тяжелыми металлами и серой. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1998. 47 с.

*Федорец Н. Г., Дьяконов В. В., Шильцова Г. В., Литинский П. Ю.* Тяжелые металлы на территории Республики Карелия // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии. Петрозаводск, 1999. С. 225–226.

*Федорец Н. Г., Медведева М. В.* Методика исследования почв урбанизированных территорий (учебно-методическое пособие для студентов и аспирантов эколого-биологических специальностей). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 82 с.

*Федорец Н. Г., Медведева М. В.* Эколого-микробиологическая оценка состояния почв города Петрозаводска. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 96 с.

*Федорец Н. Г., Морозова Р. М., Бахмет О. Н.* Почвы и почвенный покров Заонежья Карелии // Тр. КарНЦ РАН. 2004. Вып. 6. С. 69–89.

*Федорец Н. Г., Соколов А. И., Крышень А. М. и др.* Формирование лесных сообществ на техногенных землях северо-запада таежной зоны России. Петрозаводск, 2011. 130 с.

*Федорец Н. Г., Шильцова Г. В.* Фоновое и локальное загрязнение территории Республики Карелия тяжелыми металлами и серой // Междунар. форум по проблемам науки, техники и образования. М., 2001. С. 69–70.

*Хованская М. А.* Методика оценки комфортности жизнедеятельности в горнодобывающих районах в местах распространения вечномёрзлотных пород: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2012. 24 с.

*Цинк и кадмий* в окружающей среде / Алексеенко В. А., Алещукин Л. В., Беспалько Л. Е. и др. М., 1992. 199 с.

*Черненко Т. В.* Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 191 с.

*Шильцова Г. В.* Тяжелые металлы в почвенных водах Северной Карелии // Биологические основы изучения, освоения и охраны животного и растительного мира, почвенного покрова Восточной Фенноскандии. Петрозаводск, 1999. С. 226.

*Ширяева Т. А.* Микроэлементы в почвах сосновых лесов // Генезис и свойства песчаных почв Карелии. Л., 1982. 144. С. 115–123.

*Янин Е. П.* Введение в экологическую геохимию. М.: ИМГРЭ, 1999. 68 с.

*Яшин И. М., Раскатов В. А., Шишов Л. Л.* Водная миграция химических элементов в почвенном покрове. М.: МСХА, 2003. 316 с.

*Adriano D. C.* Trace elements in the terrestrialeenvironment. New York: Springer Verlag, 1996. 533 p.

*Berrow M. J., Reaves Y. A.* Total chromium and nickel contents of Scottish Soils // *Geoderma*. 1986. Vol. 37, N 1. P. 15–27.

*Bheemalingeswara K.* Geochemical exploration data: Utility in environmentalstudies // *Rapp. och medd.* 1991. N 69. P. 123–125.

*Brown P., Welch R., Cary E.* Nickel a micronutrient essential for higher plants // *Plant Phisiol.* 1987. Vol. 85, N 3. P. 801–803.

*Depaolis F., Kukkonen J.* Binding of organic pollutants to humic and fulvic acids – influence of pH and the structure of humic material // *Chemosphere*. 1997. Vol. 34, N 8. P. 1693–1704.

*Fedorets N. G.* The effect of industrial emission on soils near the Kostomuksha ore-dressing plant // *Soil in the Environment*. 26 Congress of the Polish Soil Science Society. Krakov, Poland: Jagiellonian University, 2003. P. 415.

*Gregorauskiene V., Kadūnas V.* Vertical distribution of trace and major elements within soil profile in Lithuania // *Geological Quarterly*. 2006. 50 (2). P. 229–237.

*ISO.* Soil quality – vocabulary, part 1. Terms and definitions relating to the protection and pollution of the soil. International Standards Organisation ISO. 1996. 11074 (1). 22 p.

*Jones K. T.* Thalium // *Heavy metals in soils* / Ed. J. B. Alloway. N. Y.: John Wiley&Sons, 1990. P. 304–309.

*Jorgensen S.* Mobility of metal in soil // Soil Res. Den. Kobenhavn. Esbjerg, 1991. P. 104–114.

*Kabala C., Chodak T., Szerszen L. et al.* Factors influencing the concentration of heavy metals in soils of allotment gardens in the city of Wroclaw, Poland // Fresenius Environmental Bulletin. 2009. Vol. 18, N 7. P. 1118–1124.

*Kabala C., Singh B. R.* Fractionation and Mobility of Copper, Lead, and Zinc in Soil Profiles in the Vicinity of a Copper Smelter // J. Environ. Qual. 2001. N 30. P. 485–492.

*Lacatusu R.* Appraising levels of soil contamination and pollution with heavy metals // European Soil Bureau – Research Report. 2000. N 4. P. 393–402.

*Nriagu J. O.* A silent epidemic of environmental metal poisoning // Environ. Pollution. 1988. N 50. P. 139–161.

*Osipov G. A., Turova E. S.* Studying species composition of microbial communities with the use gas chromatography-mass spectrometry // Microbial community of kaolin. FEMS Microb. 1997. Rev. 20. P. 437–446.

*Rawling B. G., Lister T. R., Mackenzie A. C.* Trace metal pollution of soils in northern England // Environmental geology. 2002. N 42. P. 612–620.

*Ross S. M.* Retention, Transformation and Mobility of Toxic Metals in Soils // Toxic Metals in Soil-Plant Systems. John Wiley & Sons, Chichester, U. K., 1999. P. 63–152.

*Ruhling A., Steiness E.* (eds.) Atmospheric Heavy Metal Deposition in Europe 1995–1996. Nord, 1998. Vol. 15. 66 p.

*Senesi G. S., Baldassarre G., Senesi N., Radina B.* Trace element inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human health // Chemosphere. 1999. Vol. 39, N 2. P. 343–377.

*Shacklette H. T., Boerngen J. G.* Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous. United States: U. S. Geological Paper 1270, 1984. 105 p.

*Tikkanen E., Niemela I.* Kola Peninsula pollutants and forest Ecosystems in Lapland / Finlands Ministry of Agriculture and Forestry. The Finish Forest Research Inatitute. Oy-Juvaskula Gummarus Kirjapaino, 1995. 82 p.

*Tobias F. J., Bech J., Sanchez Algarra P.* Statistical approach to discriminate background and anthropogenic input of trace elements in soils of Catalonia, Spain // *Water, Air, and Soil Pollution*. 1997. N 100. P. 63–78.

*Yamauch O., Odani A.* Stability constants of metal complexes of amino acids with charged side chains – Part 1: Positively charged side chain // *Pure and Applied Chem.* 1996. N 68. 469 p.

*Yoardar, M. Shama Yoardar, A. Sharma.* Manganese in cell metabolism of higher plants // *The Botanical Review*. 1991. Vol. 57, N 2. P. 117–149.

*Zhang W. X., Bouwer E. E. J., Ball.* Bioavailability of hydrophobic organic contaminants: effects and implications of sorption-related mass transfer on bioremediation // *Ground Water Monitoring Remediation*. 1998. Vol. 18, N 1. P. 126–138.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	5
<b>Глава 1. Загрязнение почв тяжелыми металлами (обзор проблемы)</b> (Г. В. Ахметова) .....	9
<b>Глава 2. Фоновый мониторинг лесных почв в Карелии</b> ..	17
2.1. Фоновый экологический мониторинг лесных почв в северотаежной подзоне Карелии (заповедник «Костомукшский») (Н. Г. Федорец, А. Н. Солодовников) .....	18
2.2. Фоновый экологический мониторинг лесных почв в среднетаежной подзоне Карелии (заповедник «Кивач») (Н. Г. Федорец) .....	41
<b>Глава 3. Тяжелые металлы в почвах ландшафтов среднетаежной подзоны Карелии</b> (Г. В. Ахметова) .....	55
3.1. Содержание тяжелых металлов в почвах ландшафтов среднетаежной подзоны Карелии .....	60
3.2. Внутрипрофильная миграция тяжелых металлов в почвах ландшафтов среднетаежной подзоны Карелии .....	83
<b>Глава 4. Почвенный экологический мониторинг в зоне воздействия Костомукшского горно-обогатительного комбината</b> .....	93
4.1. Влияние аэротехногенных поллютантов Костомукшского горно-обогатительного комбината на почвы прилегающей территории (Н. Г. Федорец) .....	94
4.2. Микробиологическая диагностика почв, находящихся в условиях промышленного загрязнения (М. В. Медведева) .....	109
<b>Глава 5. Загрязнение тяжелыми металлами почв города Петрозаводска</b> .....	119

5.1. Экологическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почв города Петрозаводска (С. Г. Новиков) . . .	120
5.2. Микробиологическая оценка почв города Петрозаводска (М. В. Медведева) . . . . .	136
<b>Глава 6. Тяжелые металлы в почвах вырубок Карелии (Ю. Н. Ткаченко) . . . . .</b>	<b>148</b>
<b>Глава 7. Загрязнение тяжелыми металлами почв Карелии</b>	<b>160</b>
7.1. Содержание тяжелых металлов в почвах Карелии: средние региональные данные (О. Н. Бахмет) . . . . .	160
7.2. Оценка суммарного показателя загрязнения тяжелыми металлами почв Карелии (Г. В. Ахметова) . . . . .	187
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>195</b>
<b>Литература . . . . .</b>	<b>201</b>

## CONTENTS

<b>Preface</b> .....	7
<b>Chapter 1. Heavy metals pollution of soils (overview of the problem)</b> (G. V. Akhmetova) .....	9
<b>Chapter 2. Background monitoring of forest soils in Karelia</b> .....	17
2.1. Background ecological monitoring of forest soils in the north-taiga subzone of Karelia (Kostomukshsky nature reserve) (N. G. Fedorets, A. N. Solodovnikov) .....	18
2.2. Background ecological monitoring of forest soils in the middle-taiga subzone of Karelia (Kivach nature reserve) (N. G. Fedorets) .....	41
<b>Chapter 3. Heavy metals in soils of Karelian mid-taiga landscapes</b> (G. V. Akhmetova) .....	55
3.1. Heavy metal concentrations in soils of Karelian mid-taiga landscapes .....	60
3.2. Migration of heavy metals within soil profiles in mid-taiga landscapes of Karelia .....	83
<b>Chapter 4. Ecological monitoring of soils in the Kostomuksha ore-dressing mill impact zone</b> .....	93
4.1. Impact of air-borne industrial pollution from the Kostomuksha ore-dressing mill on adjacent soils (N. G. Fedorets) .....	94
4.2. Microbiological diagnosis of soils exposed to industrial pollution (M. V. Medvedeva) .....	109
<b>Chapter 5. Heavy metal contamination in soils of Petrozavodsk</b> .....	119
5.1. Environmental assessment of heavy metal contamination in soils of Petrozavodsk (S. G. Novikov) ...	120

5.2. Microbiological assessment of soils in Petrozavodsk (M. V. Medvedeva) . . . . .	136
<b>Chapter 6. Heavy metals in soils of felled sites in Karelia</b> (U. N. Tkachenko) . . . . .	148
<b>Chapter 7. Heavy metal contamination in soils of Karelia . . .</b>	160
7.1. Heavy metal levels in soils of Karelia: regional averages (O. N. Bakhmet) . . . . .	160
7.2. Estimation of the integrated heavy metal pollution index for soils of Karelia (G. V. Akhmetova) . . . . .	187
<b>Conclusion . . . . .</b>	198
<b>References . . . . .</b>	201



Научное издание

# **ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ КАРЕЛИИ**

*Печатается по решению Ученого совета  
Института леса Карельского научного центра РАН*

Редактор Л. В. Кабанова  
Оригинал-макет Н. Н. Сабанцева

Подписано в печать 26.10.15 г.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура Times.  
Уч.-изд. л. 10,5. Усл. печ. л. 12,9.  
Тираж 200 экз.

Отпечатано в типографии ИП Н. А. Маркова